

ANÁLISE DE ESTRUTURAS INVERSORAS NÃO ISOLADAS MONOFÁSICAS PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Marcos G. Alves¹, Moacyr A. G. de Brito², Carlos A. Canesin¹

¹Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira – SP, Brasil

²Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande – MS, Brasil

e-mail: canesin@dee.feis.unesp.br

Resumo – Este artigo apresenta comparações entre estruturas monofásicas a duplo estágio não isoladas, para aplicações em geração distribuída fotovoltaica (GD-FV), em conexão à rede de distribuição em baixa tensão. Considerando aplicação para GD-FV observou-se vantagens significativas para conversores com características naturais de fonte de corrente para a entrada, fato que reduz a capacitância de desacoplamento do sistema FV. Resultados de simulação, análises qualitativas e resultados experimentais de uma aplicação são discutidos para confirmar a viabilidade da proposta. O protótipo desenvolvido é controlado digitalmente via DSC (*Digital Signal Controller*), incluindo o algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) P&O (*Perturb and Observe*) e está de acordo com a norma NBR-IEC 62116:2012, incluindo as proteções de ilhamento.

Palavras-Chave – Energia Fotovoltaica, Geração Distribuída, Ilhamento, Inversores Monofásicos, MPPT.

ANALYSIS OF SINGLE-PHASE NON-ISOLATED INVERTER STRUCTURES APPLIED TO PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION

Abstract – This paper presents comparisons among non-isolated DC to AC double-stage single-phase structures, applied to photovoltaic distributed generation (PV-DG), suitable to operate connected to the AC electric power network. Considering the PV-DG application, this paper has focused on converters with natural current source input characteristic which allows low capacitance value required for PV power decoupling. Simulation results and qualitative analysis are presented and experimental results from an application are discussed in order to confirm the feasibility of the proposal. The developed prototype is digitally controlled by a DSC, considering the designed firmware for MPPT, and in agreement with NBR-IEC 62116:2012 standard, including islanding and electrical protections.

Keywords – Distributed Generation, Islanding, MPPT Photovoltaic Energy, Single-Phase Inverters.

Artigo submetido em 11/08/2016. Primeira revisão em 06/10/2016. Aceito para publicação em 14/12/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

I. INTRODUÇÃO

A demanda mundial crescente por energia e a presente preocupação com a redução gradual da disponibilidade de fontes convencionais de energia, como o carvão e os combustíveis fósseis, aliados à grande preocupação ambiental, tem levado a incentivos e avanços em pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia com menores impactos ambientais e econômicos. A grande maioria das fontes de energias renováveis como a eólica, a biomassa, hidroelétrica e das marés são originadas mesmo que indiretamente da energia solar. O grande número de estruturas para conversão de energia disponíveis torna interessante que se realize uma análise qualitativa das estruturas de potência com ênfase na microgeração de energia fotovoltaica [1], [2], onde os investimentos são amortizados em médio prazo.

Neste contexto, buscar elevado rendimento, qualidade de energia e vida útil média compatível são o foco da eletrônica de potência. Quando se considera a microgeração distribuída, a fonte fotovoltaica provê baixa tensão CC (contínua) que demandará um conversor elevador provido de um algoritmo de MPPT (*maximum power point tracking*) com elevado fator de rastreamento [3]-[7], vida útil compatível com os arranjos fotovoltaicos, além de baixo conteúdo harmônico para as correntes injetadas na rede em CA (corrente alternada). Estes critérios podem ser determinantes para o uso atual e futuro destas fontes alternativas e renováveis de energia tais como a solar e eólica uma vez que as aplicações mais desejadas são aquelas conectadas à rede de distribuição, sem armazenamento de energia, onde todos os benefícios da geração distribuída podem ser alcançados [1]-[4].

Desta forma, serão revisadas neste artigo algumas estruturas não isoladas monofásicas apropriadas para fontes solares fotovoltaicas, com extração de máxima potência e com proteções de anti-ilhamento e sincronismo com a rede em CA. Resultados experimentais são apresentados e analisados para o conversor Boost Entrelaçado em cascata com o inversor VSI (*Voltage Source Inverter*) monofásico.

II. ESTÁGIOS DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS

Para aplicações de baixa potência, até 1 kW, tipicamente a associação de módulos fotovoltaicos não atendem as especificações de níveis de tensão para aplicação na rede de distribuição em baixa tensão, que é normalmente de 127 V ou 220 V, em valores eficazes nominais, no país. Desta forma, para a conexão com a rede em CA, o conversor deve realizar duas importantes tarefas como a elevação de tensão e

a sua inversão [8]-[10]. Quando a isolamento galvânica é obrigatória, a elevação de tensão pode ser obtida facilmente pela inserção de um transformador em baixa frequência do lado da rede ou pela utilização de um conversor isolado em alta frequência. Ambas soluções apresentam problemas inerentes [10]. Entretanto, quando a isolamento galvânica não é obrigatória a solução mais comum é o uso de um conversor CC-CC prévio ao estágio inversor, como mostra a Figura 1.

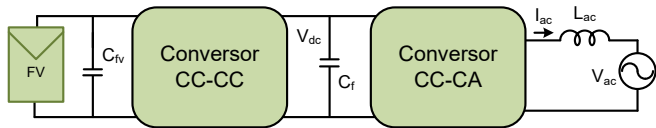


Fig. 1. Estágios de conversão de energia.

A falta de isolamento galvânica não afeta necessariamente a segurança operacional. As proteções elétricas são parâmetros de projeto que devem incluir alternativas como aterramento e dispositivos de proteção diferencial. Ainda, a inserção de proteções externas como disjuntores e para-raios são interessantes nas instalações FV. A viabilidade das estruturas não isoladas cresce em virtude da redução de peso, volume e custos [1]-[10]. Um ponto a se adicionar é que com a eliminação do transformador de baixa frequência reduzem-se também os custos de produção e de transporte. Com relação ao rendimento espera-se que os custos das chaves com baixíssimas perdas se reduzam para propiciar elevação de rendimento com custo acessível.

Os sistemas conectados à rede têm como principal vantagem a não necessidade de acumuladores de energia (baterias) reduzindo seu custo de instalação e manutenção. Aliado a isto tem-se na possibilidade das novas redes inteligentes a otimização e exportação de energia, com a possibilidade de pagamento/bônus ao produtor de energia.

III. ANÁLISES DAS ESTRUTURAS E SIMULAÇÕES

Considerando a necessidade do ganho de tensão e rendimento compatível, os sistemas inversores selecionados para análise são os sistemas a duplo estágio elencados por: Boost + VSI, Boost Entrelaçado + VSI, Boost Quadrático Modificado + NPC, Boost Entrelaçado + NPC, ReBoost + NPC.

Deve ser apontado que a maioria dos módulos FV possuem potência por volta de 200 W, com tensão no MPP (*maximum power point*) (V_{MP}) próxima de 27 V e corrente no MPP (I_{MP}) por volta de 7,7 A, para a condição padrão de temperatura e insolação (STC, *Standard Test Condition*). Assim, para a potência nominal de 1 kW serão necessários tipicamente 5 módulos em série. Idealmente, quanto menor o número em associação melhor a eficiência do algoritmo de MPPT [3]-[7]. Para prover a potência necessária, adotou-se um arranjo de 5 módulos em série, com tensão equivalente de 135 V e corrente de 7,7 A, resultando em 1040 W de potência ativa no MPP.

As simulações foram realizadas na plataforma Matlab/Simulink®, nas quais os estágios CC-CC operam em 25 kHz e os estágios CC-CA operam em 20 kHz. Os conversores injetam energia na rede de 127 V eficazes, 60 Hz. Para a topologia Boost foram utilizados um indutor CC de 3 mH, dois indutores CA de 3,5 mH e um capacitor de elo

CC de 780 μ F; para a topologia Boost entrelaçado + NPC foram utilizados dois indutores CC de 1,75 mH, dois indutores CA de 1,75 mH e dois capacitores de elo CC de 390 μ F; para a topologia Boost entrelaçado + VSI foram utilizados dois indutores CC de 2 mH, dois indutores CA de 3,5 mH e um capacitor de elo CC de 780 μ F; para a topologia Boost quadrático modificado + NPC foram utilizados dois indutores CC de 1,75 mH, dois indutores CA de 1,75 mH e dois capacitores de elo CC de 390 μ F; e, finalmente, para a estrutura Reboost + NPC adotou-se 0,3 mH para a indutância magnetizante, dois indutores CA de 1,75 mH e dois capacitores de elo CC de 390 μ F.

A. Boost + VSI

O sistema Boost + VSI resulta na estrutura mais básica utilizada atualmente [8]-[11]. Este apresenta projeto simples e oferece alto desempenho e confiabilidade, fato que o destaca como uma estrutura consolidada no mercado. Esta estrutura é apresentada na Figura 2.

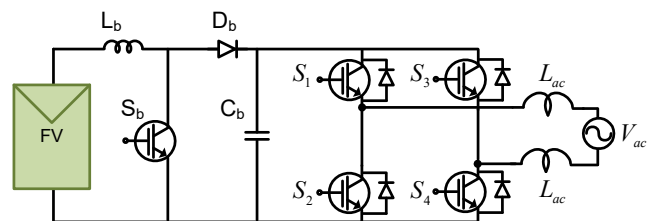


Fig. 2. Estrutura básica do conversor CC-CC Boost + VSI.

Deve-se salientar que para aplicações FV, uma grande vantagem desta estrutura é a característica da corrente de entrada quando operando no modo de condução contínua (MCC), garantindo uma corrente relativamente constante dos módulos FV, ou seja, com reduzida ondulação (*ripple*), como apresentado na Figura 3a. Isto é fundamental para assegurar a máxima extração de energia.

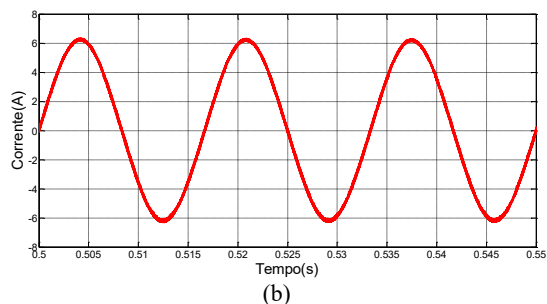
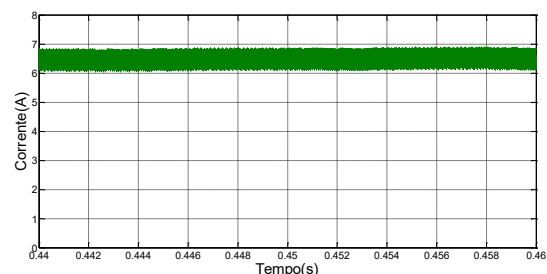


Fig. 3. (a) Corrente de entrada da associação Boost e VSI. (b) Corrente injetada na rede CA.

Obteve-se via simulação um rendimento de 94,65% para a associação Boost + VSI, sendo que um capacitor de 10 μF foi utilizado em paralelo com a fonte FV. A distorção harmônica total (DHT) da corrente injetada na rede em CA, apresentada na Figura 3b, ficou em 3,70%.

B. Boost Entrelaçado + Inversor NPC

Uma estrutura interessante para ser conectada ao conversor Boost entrelaçado é a estrutura inversora NPC (*Neutral Point Clamped*). Contudo, a mesma necessita de altos valores de tensão no barramento CC (2 vezes o valor de pico da tensão da rede CA) [11], [12].

O conversor Boost convencional pode não ser capaz de prover tal ganho já que as não-linearidades dos elementos passivos e ativos reduzem o ganho de tensão efetivo deste conversor. Devido a isto, a estrutura Boost entrelaçada oferece melhor desempenho em relação a estrutura convencional. Como a potência é dividida através das células, a corrente em cada uma é reduzida, resultando em menores perdas por condução para o estágio de entrada CC-CC. A técnica de entrelaçamento também multiplica a frequência da corrente de entrada, facilitando o processo de filtragem. A Figura 4 apresenta a estrutura básica, considerando duas células entrelaçadas. A corrente extraída do conjunto FV é apresentada na Figura 5a, juntamente com a corrente em uma das células Boost.

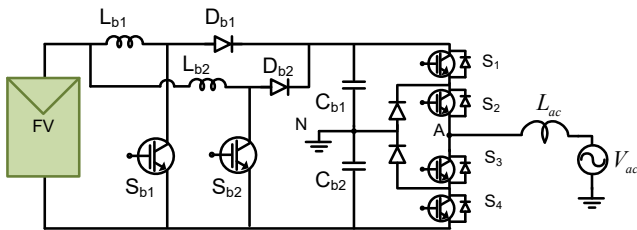
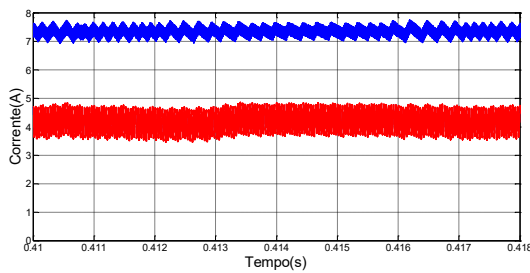
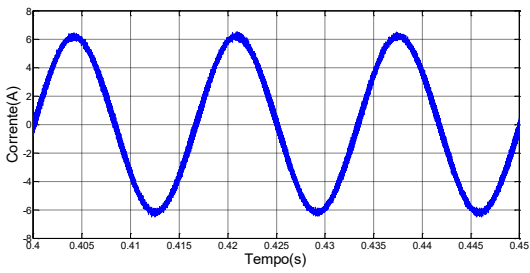


Fig. 4. Boost entrelaçado + inversor NPC.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Corrente de entrada da associação Boost entrelaçado e inversor NPC com a corrente em uma das células. (b) Corrente injetada na rede CA.

Esta associação apresentou rendimento de 95,35%, em simulação, com DHT da corrente injetada próxima de 2%, conforme Figura 5b.

C. Boost Quadrático Modificado + Inversor NPC

Considerando a problemática de altos valores de tensão sobre as chaves e os diodos na estrutura CC-CC Boost, quando operando em cascata com o inversor NPC, foi proposta uma modificação no conversor Boost quadrático convencional com o intuito de reduzir estes esforços de tensão [13], [14]. Nesta estrutura foi introduzida outra chave em conexão série, como apresentado na Figura 6.

A corrente drenada do conjunto FV é apresentada na Figura 7. Este conversor apresentou rendimento de 94,18% e DHT da corrente injetada de 1,75%, em simulação. Deve-se salientar que apesar da inerente redução de tensão na chave Boost, o volume total indutivo é aumentado em relação à estrutura Boost entrelaçada, o que leva a aumento de volume e peso totais, reduzindo a densidade de potência da estrutura.

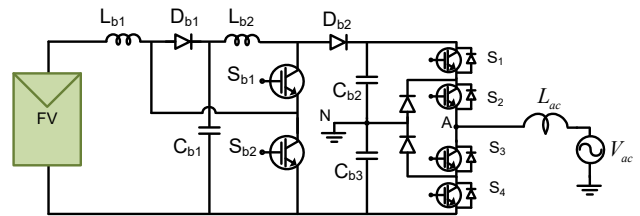


Fig. 6. Conversor Boost quadrático modificado + inversor NPC.

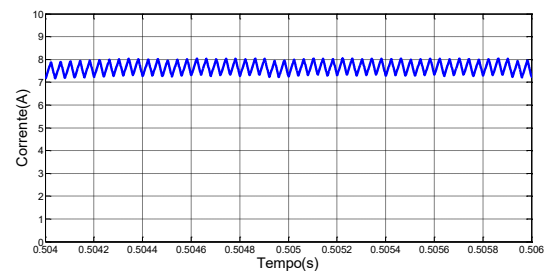


Fig. 7. Corrente de entrada da associação Boost quadrático modificado e inversor NPC.

D. ReBoost + Inversor NPC

Uma possibilidade para o aumento de rendimento dos conversores elevadores está baseada no conversor Flyback modificado, onde se propôs um caminho para o fluxo de energia diretamente da entrada para a saída [13], [14]. Desta forma, uma parcela da energia não circula diretamente pelo transformador Flyback. Esta estrutura foi denominada de ReBoost, como mostra a Figura 8.

A principal desvantagem deste conversor é sua corrente de entrada ser descontínua, requerendo um filtro capacitivo de maior valor (220 μF), em paralelo com o arranjo de módulos FV, quando comparado com as estruturas prévias em MCC. Apesar deste fato, esta estrutura apresenta rendimento de 94,15%, considerando dados de simulação, sendo mantida nesta comparação dada sua inserção bibliográfica.

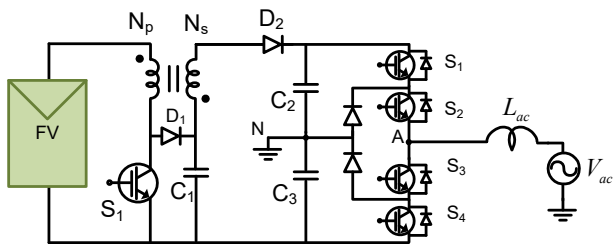


Fig. 8. Conversor ReBoost + inversor NPC.

E. Boost Entrelaçado + VSI

A associação de um conversor CC-CC Boost entrelaçado com a estrutura inversora VSI, como mostra a Figura 9, é interessante já que reduz os esforços de corrente do estágio de entrada, aliado também a multiplicação da frequência da ondulação da corrente, quando comparado ao Boost convencional, ao mesmo tempo que o inversor VSI demanda menores ganhos de tensão para o segundo estágio em relação ao inversor NPC [9]-[11]. Ainda, a topologia VSI é muito difundida na literatura apresentando menor complexidade para o controle.

A corrente CA injetada na rede resulta em DHT de 2,8% e rendimento de 95,87%, com dados extraídos de simulação, conforme Figuras 10 e 11.

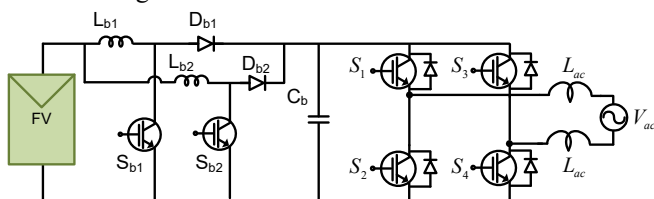


Fig. 9. Conversor Boost entrelaçado + VSI.

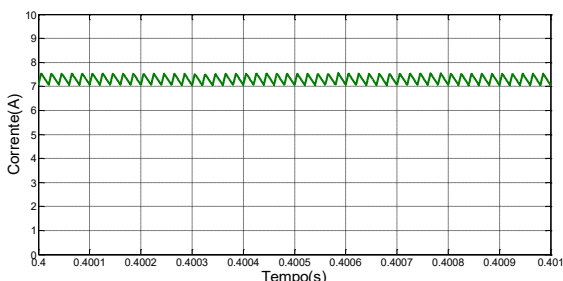


Fig. 10. Corrente de entrada da associação Boost entrelaçado + inversor VSI.

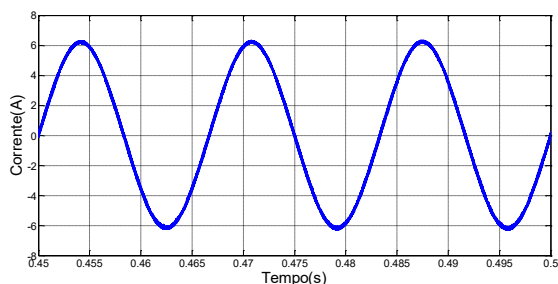


Fig. 11. Corrente injetada na rede CA.

IV. COMPARAÇÕES GERAIS ENTRE AS PRINCIPAIS ESTRUTURAS ANALISADAS

A Tabela I apresenta as comparações teóricas de rendimento, peso, volume e densidade de potência, para as principais estruturas analisadas, considerando-se apenas seus elementos do circuito de potência e dissipadores de calor mínimos necessários. As perdas por condução e por comutação dos semicondutores bem como dos indutores foram consideradas para o cômputo dos rendimentos via simulação. As perdas nos elementos capacitivos não foram consideradas, bem como dos circuitos de sensoramento e comando. Neste contexto, as estruturas baseadas no conversor elevador Boost entrelaçado se destacam dentre as demais, devido a divisão de potência entre as células, resultando em menores perdas para o estágio de entrada. O projeto dos elementos passivos também apresenta vantagens pela divisão de potência e pelo aumento da frequência da ondulação de corrente. Verificam-se menores perdas nos elementos passivos do conversor entrelaçado, em comparação com o conversor clássico, resultando em menores volume e peso.

Para o cômputo da Tabela I considerou-se o MOSFET FCP16N60N (600V, 16A) e o diodo IDD10SG60C (600V, 10A) para a etapa CC-CC e o IGBT HGTG7N60A4D (600V,14A) para a etapa CC-CA. O dissipador escolhido possui o perfil HS10425. Os núcleos escolhidos são o EE 65/33/39 de Ferrite e o Toroidal 157-70, respectivamente para os indutores de Boost e do filtro CA.

Em relação ao estágio inversor, a topologia VSI é interessante já que permite ao estágio elevador operar com razão cíclica reduzida o que também permite ao algoritmo de MPPT realizar a busca do MPP mesmo com grande variação da tensão de entrada, traduzindo em melhor aproveitamento da energia solar disponível. Ainda, apresenta peso reduzido, capacitor de barramento CC relativamente reduzido (com simplicidade de expansão) e melhor rendimento do que a estrutura com inversor NPC. Estas características gerais para ambos os estágios de entrada e de saída são fundamentais para uma vida útil média elevada e redução de custos do sistema.

V. ANÁLISE DA CORRENTE DE MODO COMUM

Um conversor CC-CA de reduzidos peso e volume, baixo custo e elevado rendimento é possível, considerando-se os conversores apresentados na Tabela I, uma vez que o transformador de isolamento não é utilizado. Contudo, estas soluções podem resultar em problemas de segurança, devido à capacitância parasita do conjunto de módulos fotovoltaicos. Esta capacitância parasita depende de muitos fatores, como dimensão do arranjo FV, superfície dos módulos, sujeira, umidade e das características climáticas. Considerando-se um dia ensolarado, um valor típico para esta capacitância se situa entre 100 pF à 220 pF para um módulo FV. Entretanto, se o módulo está coberto por água ou apresenta alto nível de umidade, esta capacitância pode aumentar até próxima dos 9 nF, sessenta vezes seu valor original. Esta capacitância pode levar à circulação de correntes parasitas entre o módulo (ou,

arranjo) e a terra, causando problemas de segurança, deterioração e até choque elétrico.

TABELA I
Comparações Teóricas para as Principais Estruturas

Dados Comparativos	Estruturas			
	Boost + VSI	Boost Entrelaçado + NPC	Boost Entrelaçado + VSI	ReBoost + NPC
Rendimento (%)	94,65	95,35	95,87	94,15
Indutor CC ou Indutância Magnetizante (mH)	3,00	2x2,00	2x2,00	0,30
Indutor CA (mH)	2x3,5	2x1,75	2x3,5	2x1,75
Capacitor de elo CC (µF)	780,00	2x390,00	780,00	2x390,00
Peso (kg)	1,73	1,41	1,34	1,45
Volume (cm ³)	884,38	718,78	688,97	1037,36
Densidade de Potência (W/cm ³)	1,08	1,34	1,40	0,91

Para evitar problemas de choque elétrico é interessante escolher uma estrutura com reduzida tensão de modo comum e a adição de disjuntores diferenciais para proteção. Neste contexto, dentre os diversos fatores importantes para a escolha da estrutura está a verificação da tensão de modo comum. Dependendo de sua forma, poderá ou não resultar em significativa corrente de modo comum.

Alguns resultados de simulação para as tensões de modo comum entre o terminal da associação FV e o terra da instalação (rede) são apresentados na Figura 12.

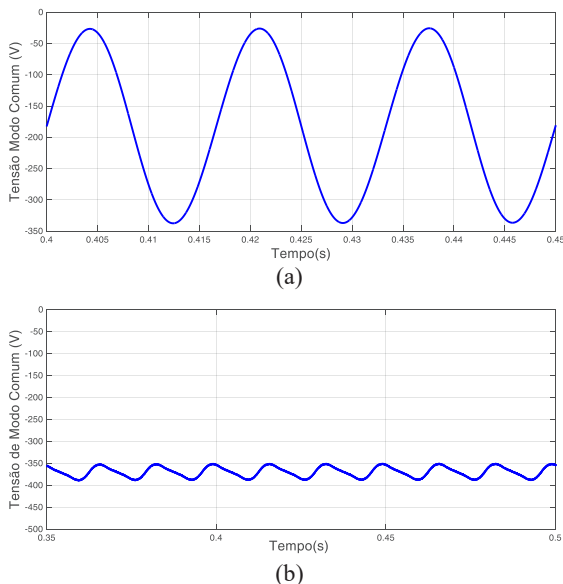


Fig. 12. Tensões de modo comum. (a) Estágio CC-CA VSI com modulação bipolar. (b) Estágio CC-CA NPC.

A Figura 12a mostra que o conversor VSI em ponte completa com modulação bipolar apresenta uma tensão CC somada a uma variação CA de baixa frequência. A divisão do filtro indutivo de conexão com a rede em CA, um por fase e de mesma indutância, em conjunto com a modulação

bipolar aplicada, garantem a eliminação das componentes de alta frequência da tensão de modo comum. A Figura 12b refere-se ao inversor NPC. Como o ponto neutro é conectado ao ponto médio do barramento CC, sempre ocorrerá uma tensão CC entre o terminal FV e o terra da instalação, minimizando flutuações de tensão e garantindo baixa corrente de modo comum.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Baseando-se nos argumentos das sessões IV e V e considerando as estruturas apresentadas na sessão III, a estrutura selecionada para implementação foi a estrutura a duplo estágio Boost Entrelaçado, operando com duas células em MCC, em cascata com um inversor VSI monofásico em ponte completa, operando com modulação bipolar. Esta estrutura foi implementada para a aplicação FV, considerando os principais dados dispostos na Tabela II. Os principais resultados experimentais foram extraídos do protótipo apresentado na Figura 13.

TABELA II
Principais Dados para Implementação do Protótipo

Boost Entrelaçado + VSI (Dados MPP no STC)	
Potência de entrada (W)	1040
Tensão de entrada (V)	135
Corrente de entrada (A)	7,7
Tensão nominal CA (V)/Freq. (Hz)	220/60
Indutâncias Boost (mH)	$L_{b1}=L_{b2}=2,0$
Capacitância Elo CC (µF)	$C_b=1460$
Tensão no Elo CC (V)	400
Filtros CA (mH)	$L_{ac1}=L_{ac2}=3,5$
Frequência Comutação Estágio CC-CC (kHz)	25
Frequência Comutação Estágio CC-CA (kHz)	20
Mosfet CC-CC	FCP16N60N
Diodo CC-CC	IDD10SG60C
IGBT CC-CA	HGTG7N60A4D

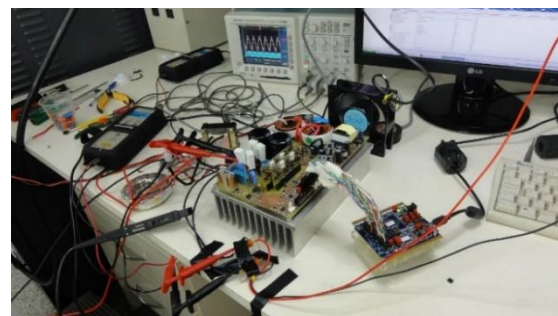


Fig. 13. Protótipo em funcionamento: Boost entrelaçado + VSI.

O desenvolvimento do protótipo considera para a maximização da extração de energia o algoritmo de MPPT P&O (*Perturb & Observe*) [3], [4]. Para a proteção e detecção de ilhamento foi implementada uma solução mista com o algoritmo ativo SMS (deslocamento de frequência em modo escorregamento) em conjunto com proteções passivas de sobre/sub tensão e sobre/sub frequência da rede em CA [15]-[17]. Ainda, o algoritmo de injeção de energia na rede (fluxo de potência) opera em sincronia com a rede devido a um algoritmo de sincronização baseado no p-PLL (*phase locked-loop*) [18]. A comunicação entre o primeiro e o

segundo estágios se dá pela flutuação de tensão no barramento CC intermediário, implementado como um laço de tensão.

A associação equivalente dos módulos FV foi emulada usando o Simulador TerraSAS (ETS 600/25) para prover a potência necessária, com os valores de corrente e de tensão no MPP. Os principais resultados experimentais são apresentados nas Figuras 14 até 20, com o intuito de confirmar a funcionalidade e desempenho da estrutura.

O algoritmo de MPPT foi testado considerando operação normal e sem sombreamento. Como resultado, tem-se uma oscilação natural próximo do MPP. Entretanto, o rendimento médio de rastreamento é acima de 98% em todos os testes. Quando o inversor é inicializado, a razão cíclica do conversor CC-CC é incrementada de forma lenta e gradual até uma certa porcentagem da tensão de circuito aberto (0,8 V_{oc}). Após finalizada a inicialização, o algoritmo P&O assume o controle. A Figura 14 mostra a extração de energia no ponto de máxima potência (MPP), obtida via interface gráfica do TerraSAS.

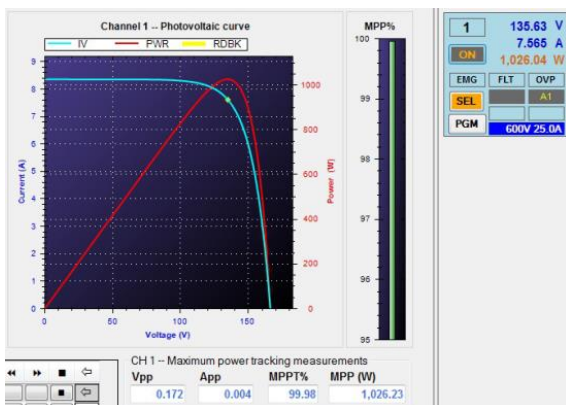


Fig. 14. Curva do sistema FV na extração de máxima potência.

As malhas de controle de corrente e de tensão foram testadas diretamente com o algoritmo p-PLL para injeção de energia na rede. A Figura 15 mostra a corrente injetada na rede em CA com DHT de 2,4%, considerando a potência nominal da aplicação.

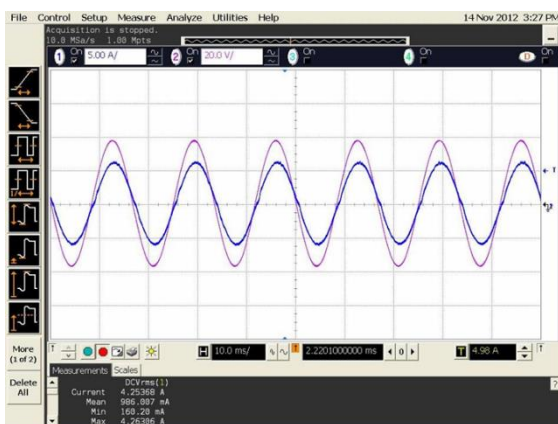


Fig. 15. Formas de onda de conexão. Em roxo tensão da rede (110V/div). Em azul corrente injetada (5A/div). Tempo: 10ms/div.

Operando concomitantemente com o algoritmo p-PLL, o algoritmo misto de anti-ilhamento foi testado com uma carga RLC de mesma potência do inversor, conforme

procedimento estabelecido na norma NBR 62116:2012 [19]. Considerando esta carga RLC (fator de qualidade unitário) o algoritmo levou aproximadamente 300 ms para detectar o ilhamento após a desconexão da rede, conforme Figura 16.

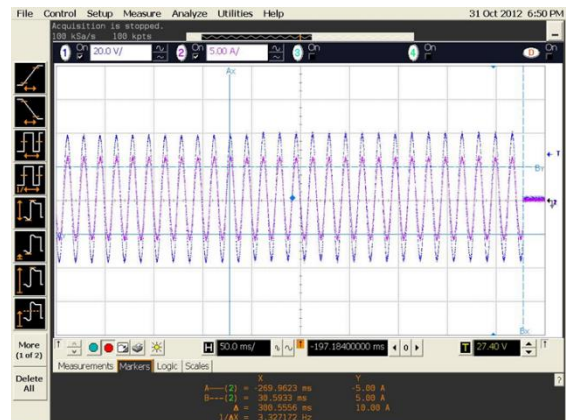


Fig. 16. Atuação do algoritmo de anti-ilhamento. Em azul tensão da rede (110V/div). Em roxo corrente injetada (5A/div). Tempo: 50ms/div.

Para demonstrar o desempenho das proteções passivas, afundamentos e elevações de tensão foram emulados com auxílio da fonte California Instruments 5001X-CTS. A Figura 17 apresenta um surto de sobretensão de 15%, com a proteção detectando esta anomalia em 95 ms. Ainda, aplicou-se uma redução de 50%, verificado pela Figura 18, com tempo de detecção de 45 ms. Considerando os testes realizados, o sistema de controle do conversor opera apropriadamente para desvios de tensão (sags e swells), considerando-se os limites das normas ABNT NBR 16149:2013 e 16150:2013 [20], [21].

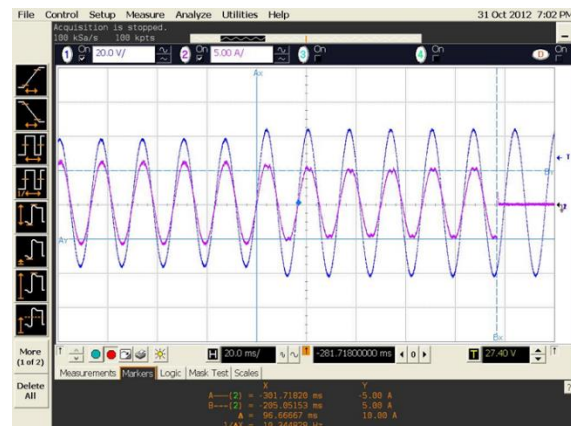


Fig. 17. Atuação da proteção passiva frente  sobretensão de 15%. Em azul tensão da rede (110V/div). Em roxo corrente injetada (5A/div). Tempo: 20ms/div.

Para realizar uma conexão segura e suave com a rede de distribuição em CA optou-se por um aumento gradual da potência transferida, tão logo seja verificada a presença da rede em CA. Isto pode ser visualizado na Figura 19.

Adicionalmente, obteve-se a curva de rendimento do sistema, envolvendo todos os sensores, fontes auxiliares e sistemas de controle, através do Yokogawa WT210. A Figura 20 apresenta as medições de rendimento com 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência de saída. Nota-se

que acima de 50% de potência de saída o rendimento já permanece próximo ao seu valor máximo (92%). Como para os dados de simulação considerou-se apenas as perdas nos elementos principais do circuito de potência, uma diferença menor do que 5% entre valores teóricos e práticos é considerada aceitável pelos autores. Finalmente, informa-se que o produto em sua versão cabeça de série industrial foi otimizado em relação à dimensão, volume e peso, entretanto, tais dados são sigilosos por contrato.

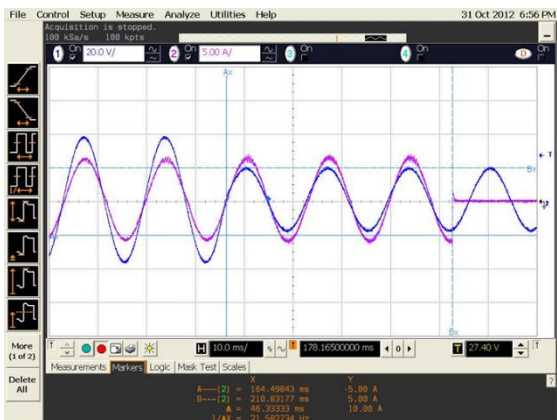


Fig. 18. Atuação da proteção passiva frente a subtensão de 50%. Em azul tensão da rede (110V/div). Em roxo corrente injetada (5A/div). Tempo: 20ms/div

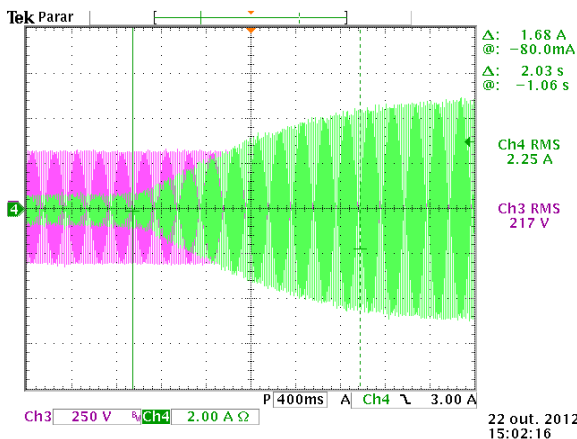


Fig. 19. Injeção suave de energia na rede de distribuição em CA. Em roxo tensão da rede (250V/div). Em verde corrente injetada (2A/div). Tempo: 400ms/div.

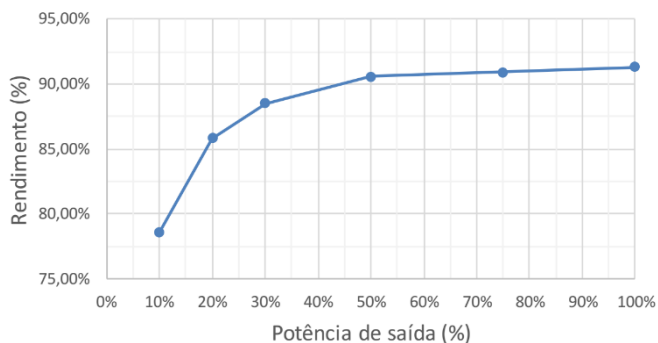


Fig. 20. Curva de rendimento experimental (Yokogawa WT210), em função da potência de saída.

VII. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo qualitativo comparativo entre algumas estruturas de conversores não isolados para aplicações na geração fotovoltaica, monofásica e de baixa potência, conectadas à rede em CA. Baseando-se nas análises foi selecionada a estrutura do conversor CC-CC Boost entrelaçado em cascata com o inversor VSI monofásico em ponte completa. Os principais resultados experimentais, incluindo o algoritmo de MPPT, o algoritmo p-PLL e o esquema de detecção híbrida de anti-ilhamento foram apresentados e discutidos, demonstrando a funcionalidade do sistema através das qualidades das formas de onda obtidas e dos índices de qualidade alcançados (fator de rastreamento para o MPPT de 98%, tempo de detecção de Ilhamento de 300ms e rendimento de 92%). O sistema de controle foi totalmente implementado de forma digital em um DSC (*Digital Signal Controller*), demonstrando a possibilidade de baixo custo para a implementação digital. Finalmente, a DHT da corrente injetada na rede é muito baixa, estando em conformidade com as normas nacionais e internacionais para sistemas de geração distribuída fotovoltaica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, CAPES e a WEG pelo apoio financeiro e de infraestrutura à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Spagnuolo, G. Petrone, S. V. Araujo, C. Cecati, E. Friis-Madsen, E. Gubia, D. Hissel, M. Jasinski, W. Knapp, M. Liserre, P. Rodriguez, R. Teodorescu, P. Zacharias, "Renewable Energy Operation and Conversion Schemes: A Summary of Discussions During the Seminar on Renewable Energy Systems", *Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, n° 1, pp. 38–51, Março 2010.
- [2] E. M. Liserre, T. Sauter, J. Y. Hung, "Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics", *Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, n° 1, pp. 18–37, Março 2010.
- [3] T. Esmar, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transaction Energy Conversion*, vol. 22, n° 2, pp. 439–449, Junho 2007.
- [4] M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. D. A. e Melo, C. A. Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, n° 3, pp. 1156–1167, Março 2013.
- [5] H. P. Desai, H. K. Patel, "Maximum Power Point Algorithm in PV Generation: An Overview", in *Proc. of 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 624–630, 2007.
- [6] A. Pandey, N. Dasgupta, A. K. Mukerjee, "A Simple Single-Sensor MPPT Solution", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, n° 2, pp. 698–700, Março 2007.

- [7] R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri, “MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison”, in *Proc. of IEEE Power Energy Society General Meeting*, pp. 1–6, 2008.
- [8] R. W. Erickson, D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [9] F. L. Luo, H. Ye, “Positive output cascade boost converters”, *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 151, no. 5, pp. 590–606, Setembro 2004.
- [10] L. G. Junior, M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, C. A. Canesin, “Single stage converters for low power stand-alone and grid-connected PV systems”, in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1112–1117, 2011.
- [11] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 1st ed. Academic Press, 2001.
- [12] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, “A new neutral-point-clamped PWM inverter”, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 1, n° 5, pp. 518–523, Setembro 1981.
- [13] Y. De Novaes, A. Rufer, I. Barbi, “A new quadratic, three-level, dc/dc converter suitable for fuel cell applications”, in *Proc. of Power Conversion Conference*, pp. 601 – 607, 2007.
- [14] C. Hutchens, Design and Control of Charge-Pumped Reboost Converter for PV Applications. Tese de Doutorado, Virginia Polytechnic Institute, Virginia, Estados Unidos da América, 2010.
- [15] G.-H. Choe, H. Kim, H. Kim, Y.-H. Choi, J. Kim, “The Characteristic Analysis of Grid Frequency Variation under Islanding Mode for Utility Interactive PV System with Reactive Power Variation Scheme for Anti-Islanding”, in *Proc. of Power Electronics Specialist Conference*, pp. 1–5, 2006.
- [16] M. Ciobotaru, V. Agelidis, R. Teodorescu, “Accurate and less disturbing active anti-islanding method based on PLL for grid-connected PV Inverters”, in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialist Conference*, pp. 4569-4576, 2008.
- [17] F. De Mango, M. Liserre, A. D. Aquila, A. Pigazo, “Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods”, in *Proc. of International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp.1878-1883, 2006.
- [18] M. S. Pádua, S. M. Deckmann, G. S. Sperandio, “Comparative analysis of synchronization algorithms based on PLL, RDFT and Kalman filter”, in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, no. 1, pp. 964-970, 2007.
- [19] Associação brasileira de normas técnicas - ABNT, *NBR IEC 62116:2012: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*, 2012.
- [20] Associação brasileira de normas técnicas - ABNT, *16149:2013: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição*, 2013.
- [21] Associação brasileira de normas técnicas - ABNT, *16150:2013: Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade*, 2013.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcos Gutierrez Alves, possui graduação em Engenharia de Computação pelo Centro Universitário FIEO (2009), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2013) e curso-técnico-profissionalizante pelo Módulo Centro Universitário (2003). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Circuitos Elétricos, Magnéticos e Eletrônicos. Atuando principalmente nos seguintes temas: inversores para geração fotovoltaica distribuída, técnicas de MPPT, técnicas de anti-ilhamento e aplicações em eletrônica de potência. Atualmente desenvolve pesquisa de doutorado nas dependências do LEP/UNESP.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP) em 1982. É engenheiro eletricitista (2005), mestre (2008), desenvolvendo projeto com reatores eletrônicos para múltiplas lâmpadas fluorescentes dimerizáveis e com correção ativa do fator de potência e doutor (2013), desenvolvendo projeto de pesquisa sobre inversores monofásicos e trifásicos integrados para aplicações fotovoltaicas conectadas à rede, ambos na área de eletrônica de potência, todos pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente é professor da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos, controle aplicado à Eletrônica de Potência, uso de FPGAs, inversores em conexão com a rede para fontes alternativas de energia.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FE/IS), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC INEP, Florianópolis-SC. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FE/IS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), ex-presidente da SOBRAEP – (gestão 11/2004 – 10/2006), é editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics e Membro do Conselho de Política Energética do Estado de São Paulo. Suas áreas de interesse incluem: energias renováveis, qualidade da energia elétrica, técnicas de comutações não-dissipativas, correção ativa do fator de potência, veículos elétricos puros, reatores para iluminação e técnicas modernas para o ensino de eletrônica de potência.