

# INVERSOR PUSH-PULL MODIFICADO DE TRÊS NÍVEIS

Luigi Galotto Jr., Gilberto S. Tatibana, João Onofre P. Pinto,  
Ruben B. Godoy, Faete J. Teixeira Filho, Helder Z. Maia  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Departamento de Engenharia Elétrica  
CEP 79070-900, C.P. 549, Campo Grande, MS  
Brasil

e-mail: lgalotto@nin.ufms.br, tatibana@nin.ufms.br, jpinto@nin.ufms.br,  
ruben@batlab.ufms.br, faete@batlab.ufms.br, heldermaia@batlab.ufms.br

**Resumo** - O objetivo deste trabalho é apresentar uma topologia de um inversor push-pull de três níveis, denominado push-pull modificado. Algumas topologias com o mesmo objetivo já foram propostas [2-3], mas, em geral, não apresentam vantagens em relação a um inversor de ponte completa. A simplicidade é a principal vantagem dos conversores push-pull, o que os torna atrativos para aplicações de baixa potência. O inversor proposto é obtido adicionando-se apenas uma chave ao push-pull padrão. Esta nova topologia permite controle completo de três níveis, utilizando menor quantidade de chaves comparado a um inversor de ponte completa. Primeiramente, a topologia do inversor será apresentada e, então, os passos de operação serão descritos, mostrando os princípios de operação e as leis de controle. Uma comparação entre quatro topologias de inversores também é apresentada. Finalmente, simulações e resultados experimentais são mostrados para a validação da topologia. Esse novo inversor é viável para aplicações com baixas tensões de entrada e que demandam modulação de três níveis, como em sistemas de geração distribuída baseada em energia renovável.

**Palavras-Chave** – Inversor monofásico, modulação em três níveis, conversor push-pull.

## THREE LEVEL MODIFIED PUSH-PULL INVERTER

**Abstract** – The aim of this work is to present a three level push-pull inverter topology called modified push-pull. Some topologies with the same objective were already proposed [2-3], but, usually, they do not have advantages related to the full-bridge inverter. Simplicity is the main advantage of the push-pull converters which turn them attractive for low power applications. The proposed inverter is obtained by adding only one switch to the standard push-pull. This new topology allows complete control for three level using less switches compared to the full-bridge inverter. First of all, the inverter topology is presented, and then operation steps are described, showing the operation principles and control laws. A comparison among four inverter

topologies is also presented. Finally, simulation and experimental results are shown to validate the topology. This novel inverter is suitable for low voltage applications that require three-level modulation, such as renewable energy based distributed generation systems.

**Keywords** - Single-phase inverter, three-level modulation, push-pull converter.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, muitas aplicações industriais ou residenciais necessitam converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) monofásica [4-8]. Para essas aplicações são utilizados conversores CC/CA, conhecidos como inversores. Basicamente, existem três tipos de topologias de inversores: ponte completa (*full-bridge*), meia ponte (*half-bridge*) e push-pull. Para a escolha da configuração mais adequada a cada aplicação, é preciso ter em mente as principais características de cada uma delas.

O inversor de ponte completa é o mais utilizado, embora tenha um maior número de dispositivos semicondutores em relação aos outros. Tanto o inversor em meia ponte quanto o push-pull possuem apenas duas chaves, o que os torna bastante atrativos. Entretanto, estas duas topologias necessitam de outros elementos para operar e as chaves precisam suportar maiores níveis de corrente e de tensão do que as chaves do inversor em ponte completa.

O inversor de ponte completa utiliza quatro chaves dimensionadas para suportar a tensão CC da entrada e a corrente de pico da entrada.

O inversor de meia ponte precisa de uma fonte com tap central. Isso pode ser obtido com o uso de capacitores como divisores de tensão, mas somente metade da tensão de entrada será aproveitada na saída e as chaves devem suportar a mesma tensão total de entrada de qualquer forma. Além disso, a corrente de pico nas chaves é o dobro em relação às chaves do inversor de ponte completa.

O push-pull precisa de um transformador com tap central e as chaves devem ser projetadas para o dobro da tensão de entrada.

Tanto o push-pull quanto o inversor de meia ponte possuem também um outro problema relacionado com a geração do nível zero. Sob determinadas condições de carga, estes inversores não são capazes de manter a tensão de saída igual a zero, impedindo as modulações de três níveis.

Em geral, aplicações relacionadas com energia renovável [1] em sistemas de geração distribuída possuem baixos níveis de tensão de entrada, sendo necessária a elevação desta

---

Artigo submetido em 25/9/2006. Revisão em 12/3/2007. Aceito por recomendação dos Editores da Seção Especial Denizar C. Martins e Fernando L. M. Antunes.

tensão. Uma maneira de elevar a tensão é o uso de conversores CC/CC elevadores para evitar o uso de transformadores e melhorar a eficiência geral pela redução de perdas magnéticas. No entanto, em alguns países a isolação galvânica para essas aplicações é obrigatória, requerendo o uso de um transformador. Independente das normas, a segurança proporcionada pela isolação galvânica, a facilidade de elevação ou redução da tensão e a robustez tornam os transformadores tecnicamente atrativos. Essas características tornam o inversor push-pull, exibido na Figura 1, uma opção interessante para esse tipo de aplicação. Nestes casos, os requisitos de um transformador com tap central e o dobro da tensão sobre as chaves possuem menor relevância. Ainda assim, a desvantagem da modulação em três níveis permanece. O nível zero desejável não pode ser produzido como o desejável quando as chaves estão desligadas com carga leve ou cargas indutivas. De fato, os diodos de roda livre conduzem através da fonte de tensão aplicando uma tensão diferente de zero à carga.

A Figura 2 ilustra o comportamento inviável da tensão de saída do inversor push-pull. As setas indicam os instantes em que a tensão de saída deveria ser zero. Diversos estudos têm sido desenvolvidos para superar o problema descrito. Este trabalho apresentará uma nova topologia que elimina tal problema e uma análise comparativa entre outros inversores desenvolvidos com o mesmo propósito. Basicamente, essa nova topologia é o inversor push-pull seguido de um conversor CC/CC abaixador, que consiste em uma chave adicional conectada em série com o conversor push-pull.

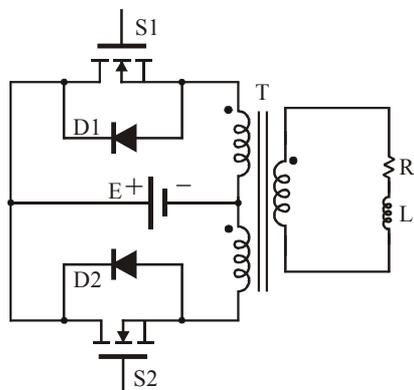


Fig. 1. Inversor push-pull.

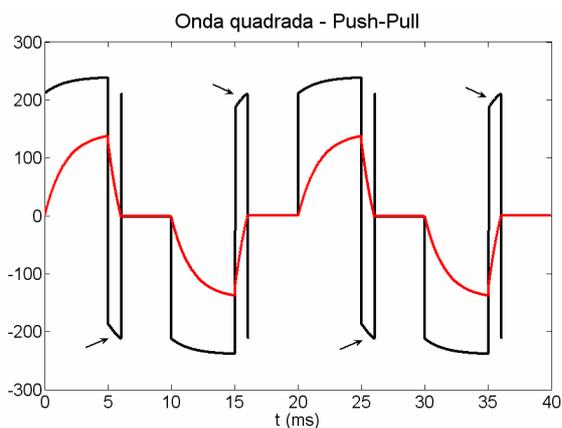


Fig. 2. Tensão e corrente de saída do push-pull.

## II. TOPOLOGIA PROPOSTA E PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO

A única diferença entre o circuito proposto e o push-pull é a chave adicional conectada em série com a fonte, como mostra a Figura 3. O uso desta chave adicional possibilita a obtenção do nível zero independente do tipo de carga. A Figura 4 ilustra a forma de onda produzida com este conversor. Essa figura foi produzida através de simulações nas mesmas condições de operação que na Figura 2. Comparando os resultados das Figuras 2 e 4 é possível identificar a diferença.

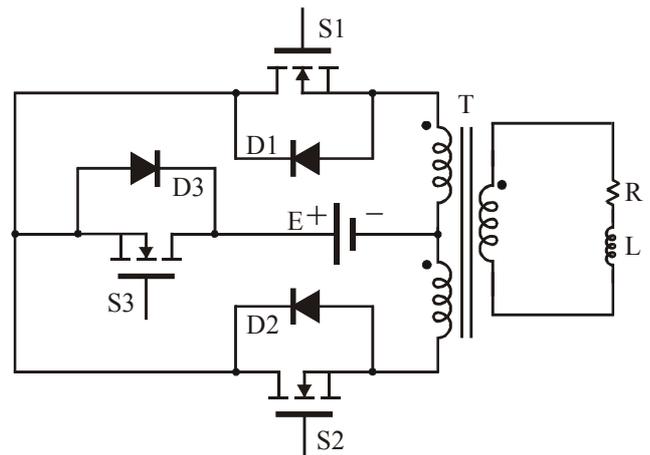


Fig. 3. Inversor push-pull modificado.

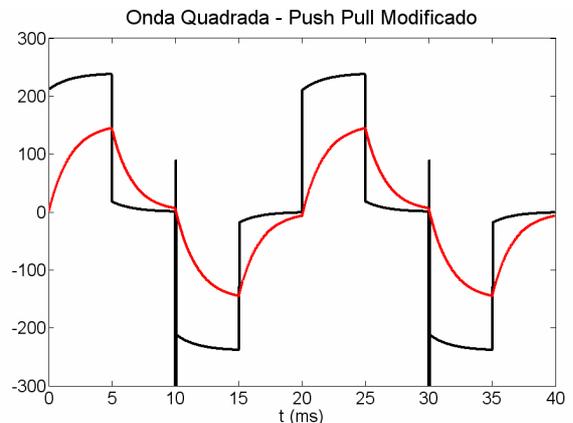


Fig. 4. Tensão e corrente de saída do push-pull modificado.

A Figura 5 mostra os quatro estágios de operação do inversor proposto. Cada estágio trabalha como segue:

Primeiro Estágio: as chaves S1 e S3 conduzem, produzindo uma tensão positiva na saída, como mostra a Figura 5.a.

Segundo Estágio: chave S3 é desligada e a corrente passa pela chave S1 e pelo diodo D2, que trabalha como um diodo de roda livre produzindo a tensão zero de saída. A Figura 5.b mostra o circuito equivalente do segundo estágio.

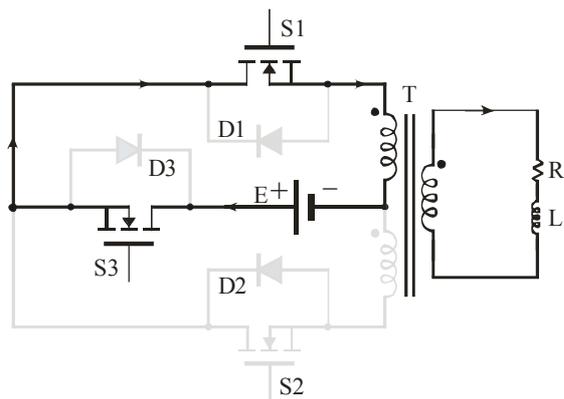
Terceiro Estágio: Durante este estágio, as chaves S2 e S3 conduzem, o que resulta em uma tensão negativa na saída, como mostra na Figura 5.c.

Quarto Estágio: O quarto e último estágio ocorre quando S3 é desligada e a corrente passa por S2 e D1. De forma

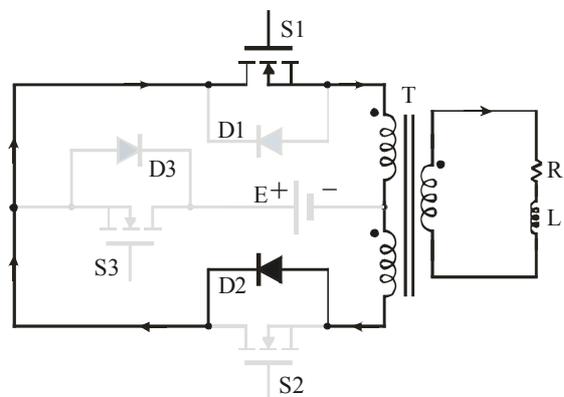
semelhante ao segundo estágio, produz-se tensão zero na saída. A Figura 5.d mostra o circuito equivalente para este estágio.

Se a corrente no segundo estágio não chegar a zero, então os diodos D3 e D2 conduzirão antes do terceiro estágio. Da mesma forma, se a corrente no quarto estágio não se anular, então os diodos D3 e D1 conduzirão antes de retornar ao estágio inicial. Estes são estágios intermediários que podem ou não ocorrer dependendo da carga. Entretanto, a tensão de saída sempre será a mesma.

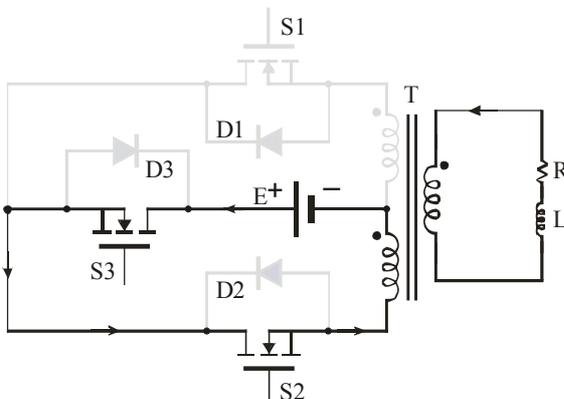
É importante notar que a chave S3 funciona como uma chave liga-desliga. Sempre que ela é desligada a tensão zero é produzida na saída.



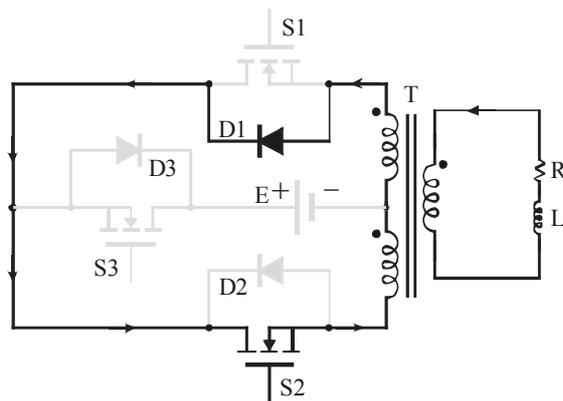
(a) Primeiro Estágio.



(b) Segundo Estágio.



(c) Terceiro Estágio.



(d) Quarto Estágio.

Fig. 5. Estágios de operação do conversor proposto.

### III. COMPARAÇÕES

Todas as topologias de push-pull de três níveis já desenvolvidas possuem pelo menos duas chaves extras. No entanto, o número de chaves não é o único aspecto a ser analisado. Uma breve comparação entre as correntes e tensões sobre as chaves bem como as formas de onda da corrente de entrada e da tensão de saída serão apresentadas nesta seção. Os inversores escolhidos para a comparação são: ponte completa, push-pull, push-pull de três níveis básico [2-3] e o push-pull modificado proposto.

Na Figura 6 são apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente de saída e da corrente de entrada para os quatro tipos de inversores comparados. Esses resultados foram obtidos por simulação com uma fonte contínua ( $V_{cc}$ ) de 100V na entrada, um transformador (1:1) e uma carga resistiva de 100W, considerando o regime permanente de operação. Na primeira coluna, estão os resultados do inversor de ponte completa. A corrente de entrada possui uma oscilação de aproximadamente 20A pico a pico devido à indutância do transformador. A configuração de três níveis básica e do push-pull modificado apresentam praticamente os mesmos resultados que os obtidos com o inversor em ponte completa. Somente o push-pull na segunda coluna não é capaz de produzir os três níveis de tensão, pois, apesar de ser resistiva, a carga é pequena em relação à indutância do transformador. Também é possível notar que a variação pico a pico da corrente de entrada é o dobro em relação aos demais conversores.

Na Figura 7, são apresentadas as tensões e as correntes sobre as chaves para cada topologia. Para o inversor de ponte completa, na primeira coluna, cada chave deve suportar tensão igual à da fonte CC da entrada e corrente de pico também igual à da entrada. Da mesma forma, para o push-pull na segunda coluna, as chaves devem suportar a corrente de pico da entrada. Porém, a tensão sobre as chaves é o dobro da tensão de entrada, o que é típico do push-pull. Para o push-pull de três níveis básico e o push-pull modificado, são exibidas duas tensões e duas correntes, organizadas em quatro linhas por apresentarem chaves operando em diferentes condições.

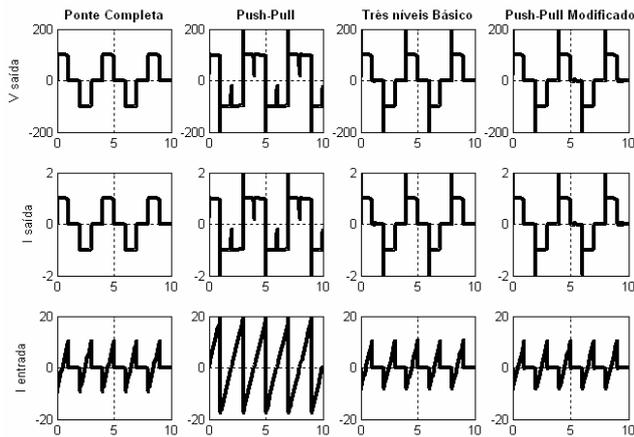


Fig. 6. Tensões de saída, correntes de saída e correntes de entrada.

Apesar de possuírem formas de onda e valores médios diferentes, os picos das tensões e das correntes para todas as chaves do push-pull de três níveis básico são iguais aos do inversor de ponte completa. Para o inversor push-pull modificado, as chaves também devem suportar a mesma corrente que o inversor de ponte completa. Duas chaves do push-pull modificado devem suportar o dobro da tensão de entrada, assim como no push-pull. A tensão na chave adicional exibida na segunda linha é igual à tensão de entrada.

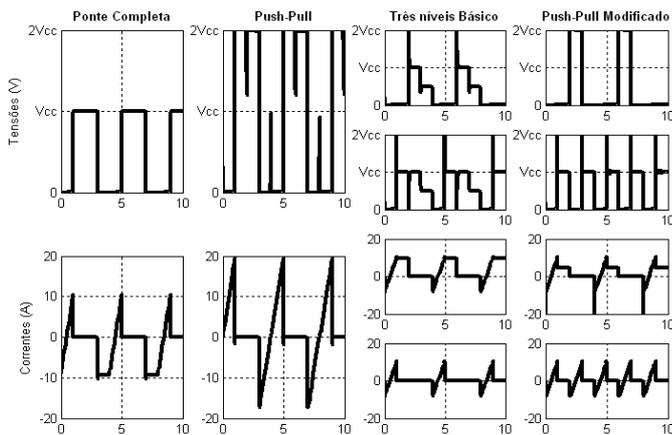


Fig. 7. Tensões e correntes sobre as chaves.

A Tabela I apresenta um resumo comparativo entre as quatro topologias analisadas. O push-pull é o único que não gera três níveis de tensão, mas ele é o que necessita de menos chaves e diodos. A contagem dos diodos da tabela inclui os diodos reversos das chaves. No caso do push-pull de três níveis básico, são necessários dois diodos além dos diodos reversos. O número de espiras no primário do transformador para o inversor de ponte completa é menor, pois ele não necessita de tap central, já que também é o único que não requer obrigatoriamente um transformador.

A corrente pico a pico está relacionada à oscilação da corrente de entrada e da corrente nas chaves. Ela existe por causa da indutância do transformador ou na presença de cargas indutivas de acordo com a equação (1), onde  $L$  são as indutâncias e  $t$  é o tempo em que as chaves permanecem ligadas.

$$I_{pp} = \frac{V_{cc} \cdot t}{L} \quad (1)$$

A corrente máxima se refere à máxima corrente de entrada que também depende da máxima corrente da carga  $I_C$  referida ao primário. Para uma carga resistiva, por exemplo, a corrente de carga será dada pela equação (2), onde  $a$  é a relação de transformação de tensão.

$$I_C = \frac{V_{cc} \cdot a}{R} \quad (2)$$

A tensão sobre as chaves é dobrada no push-pull e em duas chaves do push-pull modificado.

TABELA I  
Resumo das principais características

	Ponte Completa	Push-Pull	Três Níveis Básico	Push-Pull Modificado
Três Níveis	Sim	Não	Sim	Sim
Chaves	4	2	4	3
Diodos	4	2	6	3
Espiras no primário	N	2N	2N	2N
Transformador	Opcional	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório
Corrente pico a pico	$I_{pp}$	$2I_{pp}$	$I_{pp}$	$I_{pp}$
Corrente máxima	$I_C + I_{pp}/2$	$I_C + I_{pp}$	$I_C + I_{pp}/2$	$I_C + I_{pp}/2$
Tensão nas chaves	$V_{cc}$	$2V_{cc}$	$V_{cc}$	2 com $2V_{cc}$ 1 com $V_{cc}$

Não é o objetivo aqui determinar qual é a melhor opção. Até mesmo porque essa é função da aplicação. Para aplicações de baixa potência, por exemplo, onde a modulação em três níveis não é necessária e os níveis de tensão e corrente são baixos, o push-pull poderia ser a melhor opção. Se a modulação em três níveis for necessária, o push-pull modificado pode ser a melhor solução desde que a tensão de entrada não seja elevada, porque duas chaves terão que suportar o dobro. Neste caso, opções interessantes seriam o inversor em ponte completa e o inversor de três níveis básico. A diferença entre eles consiste em dois diodos a mais e na obrigatoriedade do uso de um transformador com tap central. Portanto, provavelmente, o inversor de ponte completa seria o mais indicado. Há ainda outras topologias de push-pull de três níveis que não foram apresentadas por não serem o foco deste trabalho. Todas estas topologias possuem quatro ou mais chaves e requerem o uso do transformador. Dessa forma é pouco provável que alguma delas seja preferível em relação ao inversor de ponte completa.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar os resultados simulados e provar o funcionamento da topologia proposta, dois protótipos foram construídos em laboratório. Um foi o push-pull padrão e o outro foi o push-pull modificado proposto. A Figura 8 e a Figura 9 mostram os resultados experimentais para uma operação com onda quadrada do push-pull e do push-pull modificado respectivamente. Em cada figura, o canal 1 mostra a tensão de saída, enquanto que o canal 2 mostra a corrente de entrada. Na Figura 8, o nível zero é atingido por

algum tempo dependendo da carga, ou seja, este nível não é produzido de forma controlada. Observe que o push-pull modificado consegue produzir o nível zero na tensão de saída controladamente, ao contrário do push-pull padrão, sob as mesmas condições de carga.

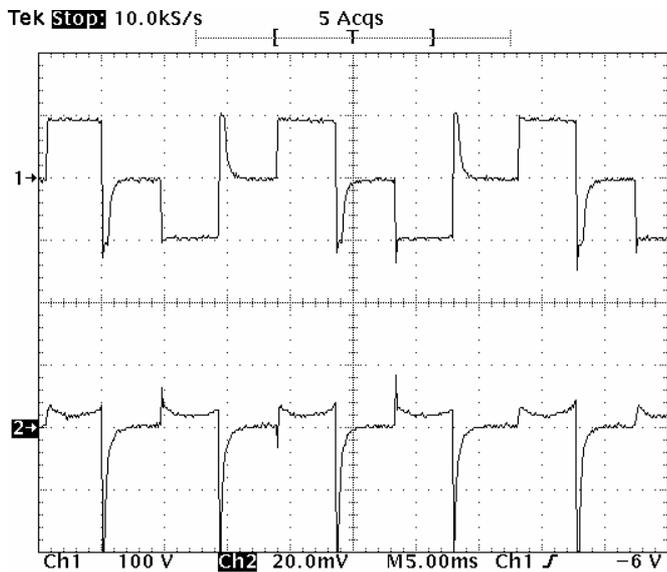


Fig. 8. Tensão e corrente de saída do conversor push-pull padrão para operação em onda quadrada.

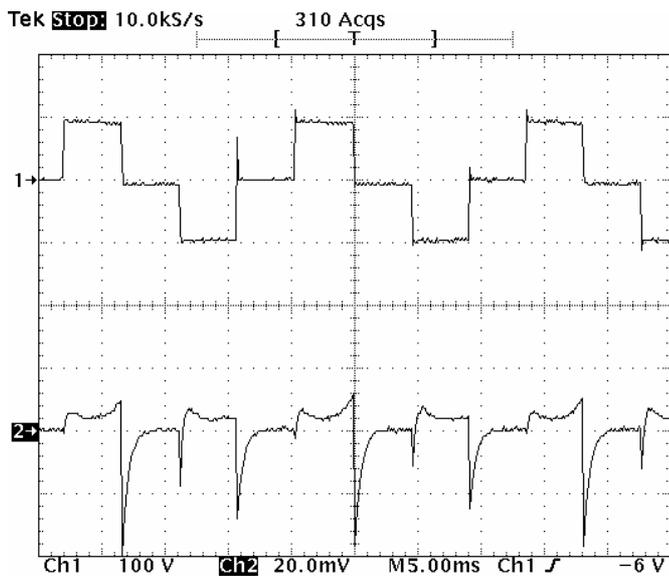


Fig. 9. Tensão e corrente de saída do conversor push-pull proposto para operação em onda quadrada.

A Figura 10 e a Figura 11 mostram os resultados experimentais quando os conversores são operados com modulação senoidal. Claramente, pode ser visto que a modulação senoidal de três níveis não funciona para o conversor padrão, já que esta topologia não mantém a tensão zero na saída. Por outro lado, a topologia proposta opera em três níveis sem problemas.

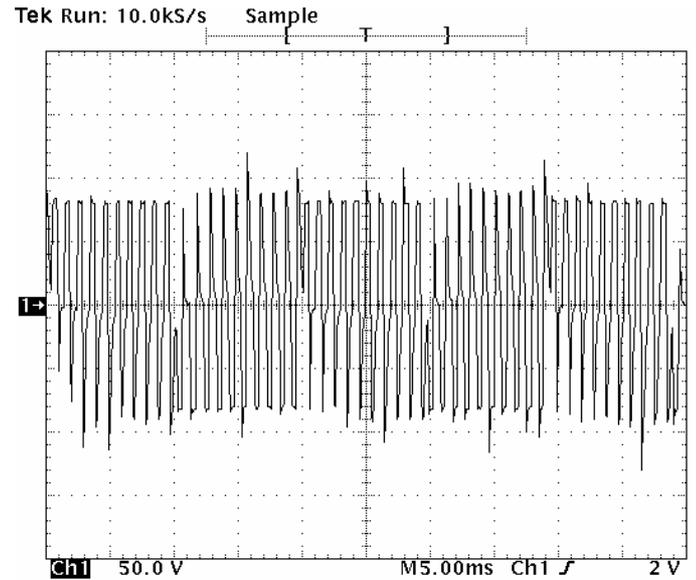


Fig. 10. Tensão de saída do conversor push-pull padrão para operação senoidal.

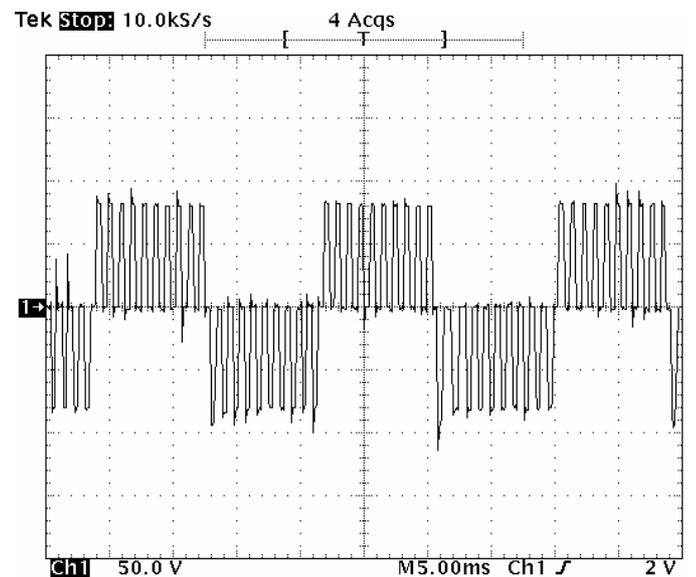


Fig. 11. Tensão de saída do conversor push-pull modificado para operação senoidal.

## V. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Supondo que o circuito opera em condições de baixas perdas, se a energia fornecida pela fonte não é absorvida pela carga, então ela deve retornar para a fonte. Esse fenômeno ocorre quando o conversor opera a vazio ou alimentando uma carga puramente indutiva. Para o push-pull convencional, a corrente flui de volta para a fonte durante o tempo em que a tensão deveria ser zero. Portanto, no lugar de zero a tensão de saída é igual à tensão de entrada, pois a tensão de entrada é aplicada na saída. Por outro lado, no push-pull modificado, durante o período em que a tensão de saída deve ser zero, a corrente flui através da chave superior e do diodo inferior ou através do diodo superior e da chave inferior. Desta forma, a tensão de saída para cargas indutivas

é zero, solucionando o problema da produção do nível zero do push-pull padrão.

O valor pico a pico da corrente de oscilação durante a operação a vazio é dado pela equação (1), mostrada anteriormente.

Um aspecto interessante do push-pull modificado é a corrente de roda livre que é a metade do valor da corrente de roda livre do push-pull padrão. Isso ocorre porque a corrente na topologia proposta flui através do dobro de espiras no transformador, como mostra as Figuras 5.b e 5.d. Dessa forma seria possível utilizar diodos para a metade da corrente, caso eles já não estejam embutidos nas chaves.

As chaves S1 e S2 têm característica semelhantes ao push-pull padrão. A chave S3 deve ser projetada para suportar tensão de entrada e a mesma corrente de pico das outras duas chaves.

## VI. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como o alvo deste conversor é um pequeno sistema de geração distribuída, experimentos foram feitos com uma carga de até 1kW. Os resultados obtidos são exibidos na Figura 12. A escala da corrente de saída é de 1A/1V, correspondendo a 5A por divisão, e a escala de tensão é de 100V por divisão, atingindo potência acima de 500W. Os picos de tensão são devido a ausência de snubbers no circuito do protótipo, que não foram necessários já que os semicondutores foram sobredimensionados para o experimento. Numa aplicação comercial, snubbers seriam necessários para possibilitar a otimização dos componentes.

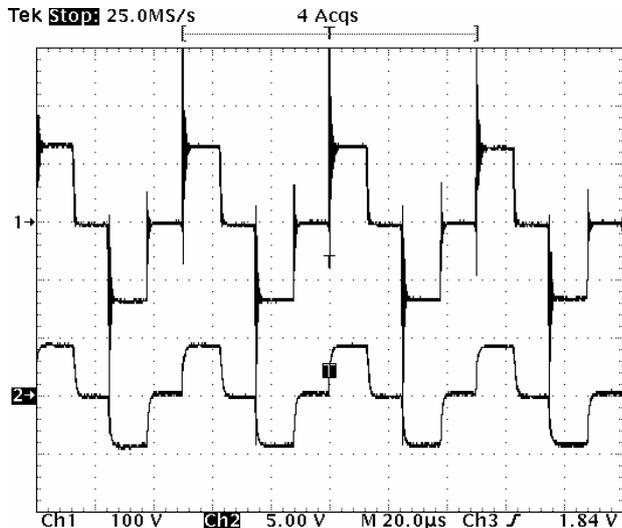


Fig. 12. Tensão e corrente de saída para o push-pull modificado.

A Figura 13 mostra a foto do circuito de potência do protótipo.



Fig. 13. Circuito de potência do protótipo.

## VII. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma nova topologia de inversor denominado push-pull modificado. As principais vantagens da topologia proposta são: a tensão de saída independente da carga e a simplicidade relativa aos demais conversores do mesmo tipo. A topologia foi apresentada e os seus passos de operação foram descritos. Resultados de simulação e experimentais foram apresentados para provar o bom desempenho do conversor proposto. Com relação ao número de chaves, esse é o inversor mais simples já apresentado na literatura com o objetivo de superar o problema da modulação de três níveis do inversor push-pull. Isso torna o inversor uma forte alternativa em diversas aplicações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, V.G. Agelidis, "Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems – An Overview", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 4, no. 23-27, pp. 1995-2000, June 2002.
- [2] A.A. Santander, A.J. Perin, I. Barbi, "A Three-Level Push-Pull Inverter: Analysis, Design and Experimentation", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 2, no. 13-17, pp. 668-674, Feb. 1994.
- [3] Y. Ma, X. Ruan, Y. Yan, "Zero-Voltage and Zero-Current-Switching PWM Push-Pull Three-Level Converters", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 4, no. 23-27, pp. 1823-1828, June 2002.
- [4] S.R. Narayana Prakash, B.S.R. Iyengar, P.V. Ananda Mohan, "A Novel High Frequency PWM Push-Pull Inverter Generates Sinusoidal Output Voltage at 50 Hz", *IEEE Telecommunications Energy Conference*, no. 21-25, pp. 35-40, Oct. 1990.
- [5] M. Malengret, "Design of a SineWave Inverter for Alternative Energy", *IEEE AFRICON Conference Proceedings*, no. 22-24, pp. 95-98, Sept. 1992.
- [6] D.C. Martins, M. Mezaroba, R. Rüther, I. Barbi, "Water Pumping from Photovoltaic Cells using a Current-fed Parallel Resonant Push-Pull Inverter", *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, no. 15-22, pp. 1529-1532, Sept. 2000.
- [7] C.Y. Liu, J.G. Zhu, and V.S. Ramsden, "A Push-pull Voltage Source Inverter with Lossless Snubber Circuits", *IEEE International Conference on Power*

*Electronics and Drive Systems*, vol. 2, no. 27-29, pp. 641-645, July 1999.

- [8] J.H Kim, S.C. Lee, B.K. Lee, S.V. Shenderey, J.S Kim, G.H. Rim, "A High-Voltage Bi-Polar Pulse Generator a Using Push-Pull Inverter", *IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 1, no. 2-6, pp. 102-106, Nov. 2003.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Luigi Galotto Jr.**, nascido em 12/02/1981 em São Paulo é engenheiro eletricista (2003) e mestre em aplicações de inteligência artificial (2006) pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Tem trabalhado como pesquisador desde 2003 e, atualmente, é professor colaborador na UFMS.

Me. Galotto tem a maior parte das publicações em congressos de eletrônica de potência do IEEE e publicações em monitoramento e diagnóstico.

**João Onofre Pereira Pinto**, nasceu em 22 de junho de 1966 em Valparaíso, S.P., Brasil. Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, em 1990. Mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, em 1993, e Ph.D. pela The University of Tennessee, Knoxville, TN, EUA em 2001.

Atualmente é professor da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil, onde ocupa o cargo de coordenador do programa pós-graduação em engenharia elétrica. Pesquisador do CNPq, suas áreas de interesse incluem mineração de dados, sistema de suporte a decisão, processamento de sinais, aplicações de redes neurais artificiais, lógica nebulosa, algoritmos genéticos e wavelets em eletrônica de potência, técnicas PWM, controle e acionamento de máquinas elétricas.

**Gilberto Shimada Tatibana**, nascido em 07/09/1971 em Adamantina – SP, recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo

Grande, MS - Brasil em 1994 e o título de Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia - MG, Brasil em 1997. Suas áreas de interesse incluem Eletrônica de Potência, TV Digital e Inteligência Artificial. Atualmente desenvolve pesquisa no projeto "Sistema de Monitoramento de Calibração de Instrumentos e Validação de Sensores Usando Inteligência Artificial".

**Ruben Barros Godoy**, nascido em 13/02/1982 em Campo Grande – MS recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS –Brasil em 2004. Atualmente é aluno do curso de Mestrado da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, no tópico de inteligência artificial, teorias e aplicações.

Integrou o time finalista da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul no desafio internacional "The 2005 International Future Energy Challenge", patrocinado pelo IEEE. Suas áreas de interesse incluem eletrônica de potência, eletromagnetismo e qualidade de energia. Atua em pesquisas nas áreas de conversores de potência, processamento de sinais e controle digital.

**Faete Jacques Teixeira Filho**, nascido em 15/06/1981 em Campo Grande – MS, recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS - Brasil em 2004. Atualmente é aluno do curso de Mestrado da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, área de concentração de Inteligência Artificial.

Integrou o time finalista da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul no desafio internacional "The 2005 International Future Energy Challenge", patrocinado pelo IEEE. Sua área de interesse inclui conversores de potência, plataformas de aquisição de dados e inteligência artificial. Atua em pesquisas nas áreas de conversores de potência, aquisição e processamento de sinais, controle de processos e eletrônica digital.