



Desenvolvimento de Protótipos de Conversores Estáticos Monofásicos-Trifásicos Para Eletrificação Rural e Acionamento de Motores Trifásicos

Enga. Maria Beatriz Duarte A. P. Medeiros
Ampla Energia e Serviços S/A
jcurty@ampla.com

Eng. Maurício Aredes
COPPE/UFRJ
aredes@ufrj.br

Eng. José Luiz da Silva Neto
DEE/UFRJ
luizneto@dee.ufrj.br

Eng. Rodrigo M. Fernandes
ENELTEC
rodrigo@eneltec.com.br

Ulisses de A. Miranda
COPPE/UFRJ
ulisses@coe.ufrj.br

RESUMO

Este artigo trata do desenvolvimento de protótipos de conversores estáticos monofásicos-trifásicos (Monotri), isto é, equipamentos que fornecem energia a cargas trifásicas a partir de uma alimentação de entrada monofásica. Dois tipos de protótipos serão considerados – conversores para aplicação em sistemas de distribuição de eletrificação rural e conversores para acionamento de motores de indução trifásicos. O trabalho baseia-se nos resultados obtidos no projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento de Conversores Estáticos Monofásicos para Trifásicos Aplicados em Acionamento e Eletrificação Rural”, que deu origem a um protótipo laboratorial do Monotri para eletrificação rural e à especificação do conversor para acionamento de motores trifásicos. No atual projeto, o enfoque é o desenvolvimento de um protótipo industrial “cabeça-de-série” do Monotri para eletrificação rural, além de um protótipo laboratorial do Monotri para acionamentos. A obtenção de resultados deste porte visa fundamentalmente proporcionar às regiões rurais e isoladas a gradual substituição dos motores monofásicos, sabidamente inferiores em desempenho, por trifásicos, além dos benefícios relacionados ao suprimento trifásico.

PALAVRAS-CHAVE

Conversor monofásico-trifásico, protótipos de conversores, eletrificação rural, correção de fator de potência, acionamento de motores trifásicos.

1. INTRODUÇÃO

É comum relacionar o desenvolvimento de regiões ou até mesmo de um país com um fornecimento adequado e eficiente de energia elétrica. Nos últimos anos, o Brasil tem investido substancialmente no setor de transmissão, principalmente na rede básica, onde ocorrem as maiores transferências de energia, para tornar sustentável o desenvolvimento sócio-econômico.

No âmbito das concessionárias distribuidoras, a imagem junto a seus clientes tem sido fator fundamental para a adoção de medidas que resultem em melhorias nos pontos críticos de seu sistema, como por exemplo, o abastecimento de regiões isoladas e de clientes de grande porte. Neste ponto, os projetos de pesquisa e desenvolvimento têm vindo ao encontro destas medidas, de modo a embasá-las economicamente e dar-lhes suporte técnico.

O problema da eletrificação rural no Brasil está sendo tratado com diferenciada atenção pelo Governo Federal, tendo em vista os programas atualmente em curso, particularmente o “Luz para Todos”, para levar energia a 12 milhões de pessoas até 2008, tarefa que constitui um desafio principalmente para as concessionárias distribuidoras. A melhoria das condições de vida e trabalho do homem do campo permite, dentre outras coisas, a adoção de processos agrícolas mais eficientes, tornando os produtos mais competitivos. Deste modo, a energia elétrica pode representar a fixação do homem no campo, reduzindo o fluxo para as grandes cidades e, em conseqüência, atenuando os graves problemas que resultam dos grandes conglomerados urbanos.

Em geral, os sistemas de eletrificação rural estão baseados em redes aéreas, monofásicas de média tensão. Esta característica das redes deixa o consumidor exposto a uma freqüência elevada de afundamentos momentâneos de tensão (voltage sags), que resultam de curtos-circuitos nos ramais e alimentadores vizinhos. Estes fenômenos podem resultar na desconexão indevida de cargas ou mesmo na queima de motores de indução ou de outros equipamentos. Tipicamente, os afundamentos de tensão em sistemas de eletrificação rural podem ter duração de centenas de milisegundos, dependendo do tipo e dos ajustes dos sistemas de proteção envolvidos.

A principal motivação deste projeto é o desenvolvimento de conversores eletrônicos que permitam a disponibilização de um sistema trifásico a partir de sistemas monofásicos com neutro. Tais conversores são baseados em chaves semicondutoras de potência e permitem, inclusive, preservar o consumidor de variações momentâneas de tensão (afundamentos e elevações). Estes equipamentos podem ainda controlar o fator de potência, melhorando a regulação de tensão nos ramais e permitindo a transferência de parcela adicional de potência.

2. MONOTRI PARA A ELETRIFICAÇÃO RURAL

O Monotri para a eletrificação rural é utilizado nas redes de distribuição rural em série com os transformadores abaixadores, conforme a Figura 1, sendo responsável por prover a energia elétrica aos consumidores rurais.

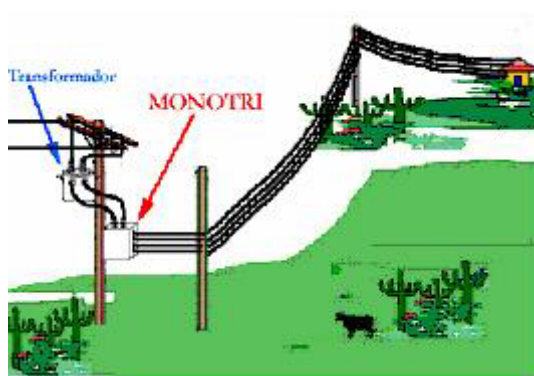


Figura 1 - Arquitetura da solução Monotri para eletrificação rural.

2.1. Topologia e Controle

Diversas topologias de conversores monofásico-trifásicos já foram propostas na literatura técnica e científica [1-6]. A escolha da topologia para a aplicação rural do Monotri foi realizada analisando-se as vantagens e desvantagens de cada uma.

Ao final de todas as análises, a topologia adotada (Figura 2) foi a que utiliza o retificador PWM boost em ponte completa associado a um inversor a quatro ramos ativos. Além de atender a todas as funcionalidades como: correção de fator de potência e fornecimento da tensão de saída trifásica regulada, a escolha deu-se, principalmente, devido ao fato de que esta topologia é alcançada acoplando-se dois inversores convencionais (largamente disponíveis no mercado) ligados na configuração “back-to-back”, tornando menor o custo da topologia, mesmo com um número maior de componentes ativos.

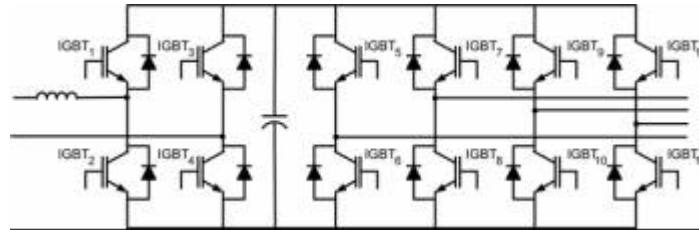


Figura 2 - Topologia do Monotri para eletrificação rural.

O controle do retificador boost consiste em regular a tensão do elo CC no seu valor de referência drenando uma corrente senoidal e em fase com a tensão monofásica de entrada, conforme mostrado na Figura 3. O resultado da comparação da tensão do elo CC (V_d) com a sua referência (V_d^*) é entregue a um controlador proporcional-integral - PI. Paralelamente, é extraída a frequência e fase de V_s através de um circuito de sincronismo Phase Locked Loop (PLL), de modo a gerar uma senóide de amplitude unitária com os mesmos valores de fase e frequência. A saída do controlador PI é multiplicada por esta senóide fornecendo a referência de corrente (I^*). Esta referência de corrente será sintetizada por meio do chaveamento PWM (Pulse Width Modulation) por modo de corrente.

A estratégia utilizada para o controle do inversor é a Seno-PWM. São geradas senóides trifásicas de referência, cujas amplitudes v_i ($i = a, b, c$) definem o valor do índice de modulação juntamente com a portadora v_{tri} . O índice de modulação de amplitude [1] é dado por:

$$m_a = \frac{v_i}{v_{tri}} \quad (1)$$

As amplitudes das tensões resultantes na saída são dadas por:

$$v_{in} = ma \frac{V_d}{2} \quad (2)$$

O quarto ramo possui o ciclo de trabalho constante e igual a 50%, de modo que o valor médio da tensão seja igual a zero. Este ramo é responsável por disponibilizar o ponto de neutro.

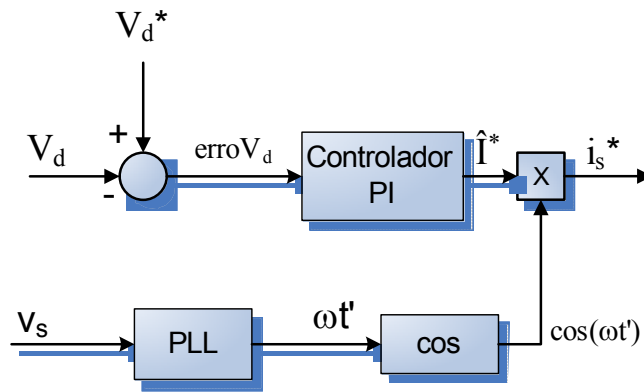


Figura 3 – Controle do retificador boost.

2.2. Topologia e Controle

Todo o controle do Monotri é executado em meio digital. As tarefas e os algoritmos requeridos para o seu controle exigem do processador que as vai executar características diversificadas, tais como:

- Alto desempenho na execução de cálculos de funções de transferência discretas, utilizadas para o processamento digital de sinais;
- Alta velocidade na aquisição de sinais analógicos (conversão A/D), para que não sejam introduzidos atrasos consideráveis no controle;
- Capacidade de geração de sinais PWM com um mínimo de interferência da CPU, para que o overhead desta tarefa não prejudique a execução dos algoritmos de controle;
- Atraso (latência) mínimo no processamento de interrupções, uma vez que a maioria das tarefas críticas é executada em tempo real, a partir de interrupções geradas por temporizadores.

Para realização dos controles propostos no circuito do Monotri, da corrente de entrada e das tensões de saída, são necessárias medições das seguintes variáveis:

- A tensão no lado de baixa (BT) do transformador, que corresponde à tensão de entrada do retificador, a fim de obter um sinal de referência para sincronização da corrente de entrada;
- A própria corrente de entrada, pois seu controle é feito em malha fechada (retroalimentação);
- A tensão do elo CC, cuja malha de controle por retroalimentação determinará a intensidade da corrente de entrada e propiciará a regulação da tensão de saída;
- Para obtenção de todas essas medidas, serão utilizados sensores de efeito Hall, que convertem os respectivos sinais de entrada em tensões de saída de baixa amplitude, com isolamento galvânico entre a entrada e a saída.

Os sinais de saída dos sensores são ainda processados em circuitos condicionadores de sinais e aplicados às entradas analógicas do microcontrolador encarregado de realizar o controle do Monotri. Estes sinais são então convertidos para a forma digital pelos circuitos conversores A/D internos ao C.I. do microcontrolador. Uma vez digitalizados, os sinais são processados em algoritmos de controle digital.

Este protótipo do conversor Monotri é constituído pelas seguintes partes:

- Conversor estático composto de seis ramos em semi-ponte com IGBTs e diodos em anti-paralelo, onde dois ramos compõem o retificador PWM totalmente controlado, um ramo forma o circuito de neutro e os três ramos restantes constituem o inversor trifásico de saída. Este conversor foi formado

pela associação de dois inversores trifásicos comerciais de fabricação da Semikron, conforme mostrado na Figura 4. Cada ramo é formado por um módulo SKM 200GB124D e um driver de disparo SKHI 26F;

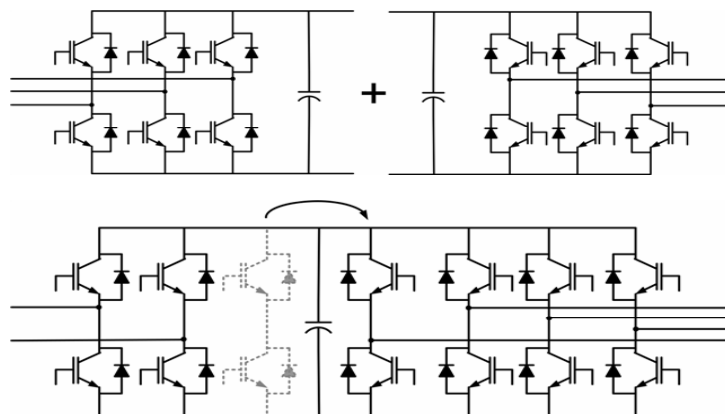


Figura 4 – Associação de dois inversores comerciais.

- Reator de comutação monofásico de 5mH/100A;
- Filtro passa-baixas trifásico de 50A com frequência de corte em 1,5kHz;
- Circuitos de interface para comando do conversor por fibra óptica, com canais independentes para controle do chaveamento de cada IGBT e retorno de sinais de proteção contra curto-circuito e subtensão;
- Controlador digital baseado no DSP TMS320F2812 da Texas Instruments, com software embarcado desenvolvido especificamente para o controle do Monotri;
- Circuitos de sensoriamento e condicionamento de sinais, para medição das variáveis utilizadas no controle do Monotri: corrente de entrada, tensão de entrada e tensão no elo CC. Todas as medições são isoladas galvanicamente, por intermédio de transdutores de efeito Hall de fabricação da LEM;

Todos os circuitos de controle são montados em placas de circuito impresso no formato Eurocard (100mm x 160mm), para facilitar o acondicionamento em racks padrão de 19”.

O resultado da montagem do protótipo industrial pode ser visto na Figura 5.



Figura 5 – Protótipo do Monotri.

2.3. Resultados

Resultados do teste do Monotri podem ser vistos nas figuras a seguir. Na Figura 6 pode-se observar que a tensão (Ch1) e a corrente (Ch4) monofásica estão em fase e que o elo CC (Ch2) está regulado. Na Figura 7 são mostradas as tensões trifásicas de saída equilibradas e reguladas. Na Figura 8 é mostrado que a tensão de saída não varia mesmo diante da variação da tensão monofásica de entrada.

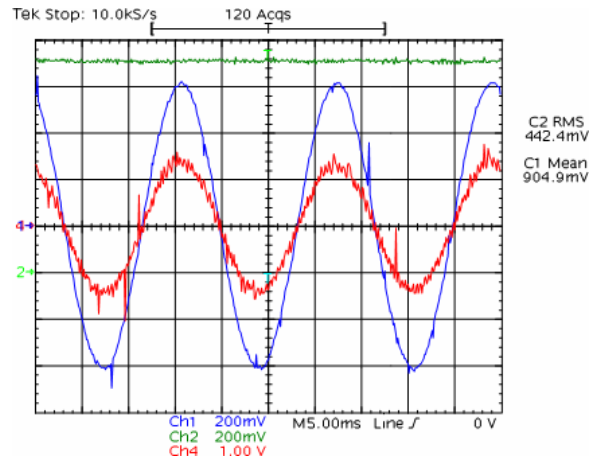


Figura 6 – Tensão e corrente monofásica e tensão do elo CC.

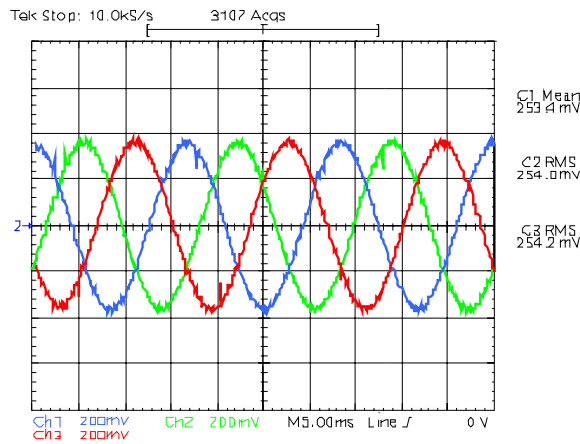


Figura 7 – Tensões trifásicas de saída.

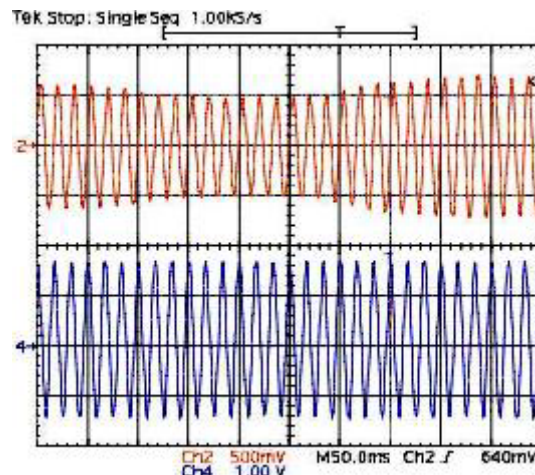


Figura 8 – Variação da tensão de entrada e da tensão de saída.

3. MONOTRI PARA ACIONAMENTO DE MOTORES

Os motores CA trifásicos do tipo indução têm sido os mais utilizados nas aplicações industriais de acionamento devido a sua robustez e baixo custo. Com o desenvolvimento da tecnologia dos conversores estáticos de potência, tem-se ampliado o interesse por estes motores nas aplicações de consumo, tais como em “home appliances” e em equipamentos utilizados em localidades remotas, onde normalmente a rede elétrica é monofásica apenas. Além disso, esses motores são menos ruidosos, apresentam melhor desempenho e condições de partida menos severas para a rede de alimentação, quando comparados com os do tipo monofásicos, especialmente aqueles na faixa de alguns CV.

Entretanto, o projeto de conversores estáticos monofásicos para trifásicos (Monotri) com vistas à utilização em larga escala, deve considerar os seguintes aspectos:

- Capacidade para fornecer tensões trifásicas a três fios com tensão fase-fase típica de $220 V_{rms}$ quando a tensão de entrada é de $127 V_{rms}$;
- A redução da distorção harmônica total na corrente de entrada (THD%);
- A melhoria do fator de potência total na entrada;
- Possibilidade de controle de velocidade, dependendo do tipo de aplicação desejado;
- Possibilidade de fluxo de energia bidirecional;
- Possibilidade de partida suave (“soft-start”), importante para a redução da corrente de partida;
- Topologia o mais reduzida possível em termos de número de componentes para minimização de custos, volume e peso;
- Verificação do conteúdo harmônico presente na saída.

A Figura 9 apresenta um diagrama genérico do conversor Monotri para acionamento, com capacidade para englobar funções de controle das variáveis de entrada e de saída. Dependendo da aplicação de interesse, alguma destas funções poderá ser desconsiderada.

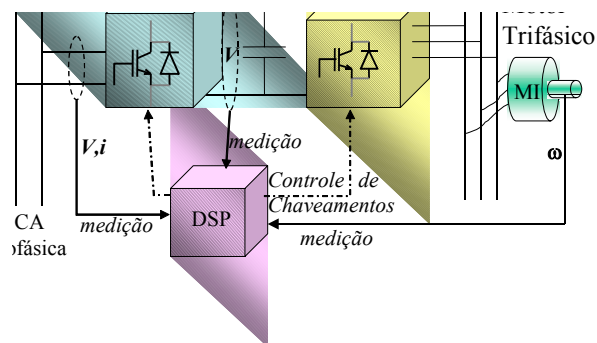


Figura 9 – Diagrama genérico do Monotri para acionamento de motores.

3.1. Descrição Geral

Foram realizados vários estudos para a seleção da topologia ideal para o Monotri para acionamentos [REFS]. Dentre as que atendiam a maior parte dos requisitos anteriores destacaram-se três que foram selecionadas para a implementação em bancada. São elas:

A. Enjeti

O conversor Monotri apresentado na Figura 10 é baseado na topologia proposta originalmente por Enjeti et al [6],[7]. O motor usado como carga conecta-se ao conversor através dos nós A, B e C e o elo CC apresenta-se na configuração “capacitor dividido”. Há apenas um terminal do motor conectado

em comum com a rede de alimentação monofásica, o que elimina a restrição de operar o motor com tensão e frequência de alimentação fixas. Com isso torna-se possível fazer a partida suave do motor. Pode-se também fazer a alimentação a partir de uma rede monofásica de 127V.

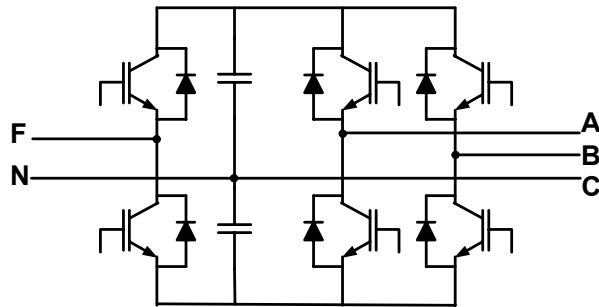


Figura 10 – Topologia Enjeti.

B. Onishi

Nesta topologia, mostrada na Figura 10, o retificador é do tipo PWM semi-controlado. O capacitor em *split* no elo CC fixa o valor da tensão em uma das pernas do motor na metade do elo. Também é possível controlar-se amplitude e frequência das tensões trifásicas. Esta topologia foi a princípio considerada pelo fato dos capacitores apresentarem corrente eficaz um pouco menor do que no caso do circuito anterior proposto por Enjeti.

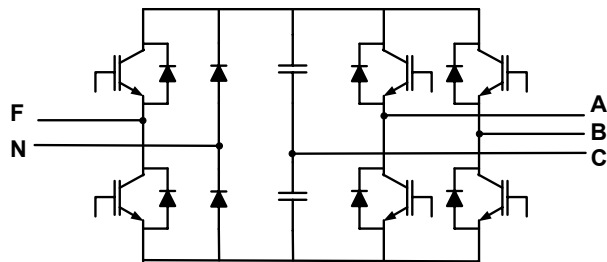


Figura 10 – Topologia Onishi.

C. Onishi Modificada

Na topologia originalmente proposta por Onishi, a tensão em um dos terminais do motor está fixa ao ponto de neutro do elo CC criado pelos dois capacitores. Pode-se, no entanto, criar também um ponto central no elo CC através de uma perna ativa onde o chaveamento PWM é efetuado com um ciclo de trabalho fixo em 50%. Partindo desta idéia a nossa equipe propôs a topologia representada na Figura 11.

Nesta versão um dos terminais da entrada monofásica é conectado ao ponto de neutro de forma que o retificador seja semi-controlado. É possível o controle de amplitude e frequência das tensões trifásicas, utilizando-se apenas um capacitor no elo.

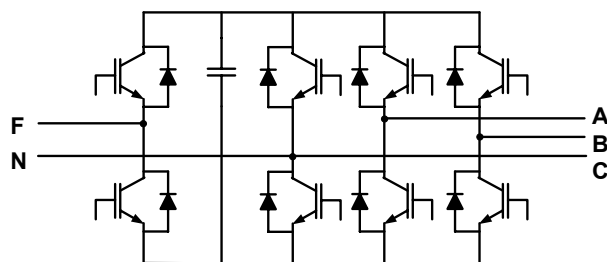


Figura 11 – Topologia Onishi Modificada.

3.2. Controle

Assim como no Monotri para eletrificação rural o controle destas topologias para acionamento de motores é dividido em duas partes: o controle do retificador e o controle do inversor.

O controle do retificador é idêntico ao apresentado anteriormente e mostrado na Figura 3. Já o controle dos dois ramos relativos ao inversor possui uma sutil diferença. Agora as referências para o Seno-PWM são compostas por apenas duas senóides defasadas de 60 graus elétricos entre si.

3.3. Resultados do Protótipo

O protótipo implementado possui as seguintes especificações:

- Tensão de entrada: 127V/60Hz F-N;
- Tensão de saída: 220V/60Hz F-F;
- Reator monofásico: 5mH;
- Frequência de chaveamento: 7380kHz;
- Motor Trifásico: Fabricante WEG; Potência 1/3 CV; Tensão nominal: 220/380; Corrente Nominal: 1.60 / 0.926; Velocidade nominal: 1748 rpm.

Para a ilustração do funcionamento do conversor foram selecionados alguns resultados das topologias descritas. Pode-se perceber que todas as topologias foram capazes de drenar corrente predominantemente senoidal e em fase com a tensão de entrada além de fornecer tensão nominal ao motor.

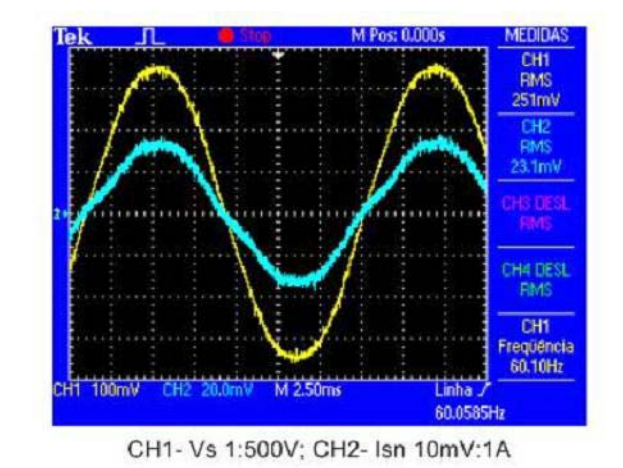


Figura 12 – Topologia Enjeti: Tensão (Ch1) e corrente (Ch2) monofásicas.

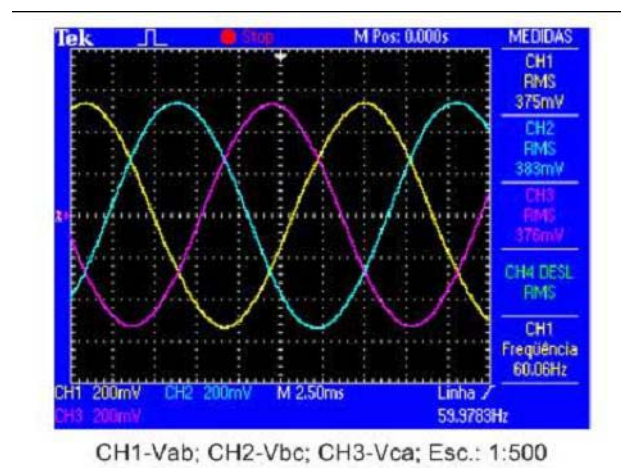


Figura 13 – Topologia Enjeti: Tensões trifásicas (filtradas) no motor

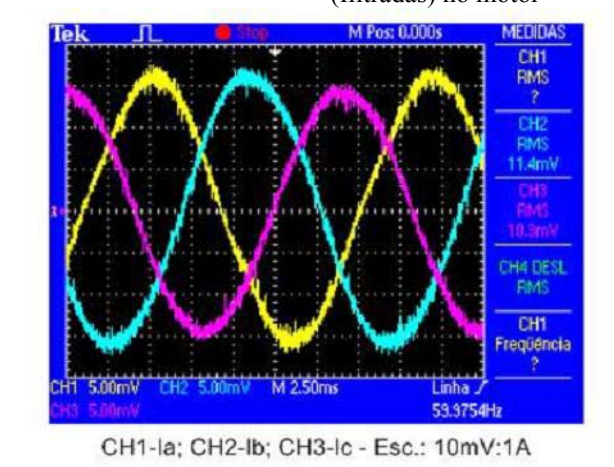


Figura 14 – Topologia Enjeti: Correntes no motor

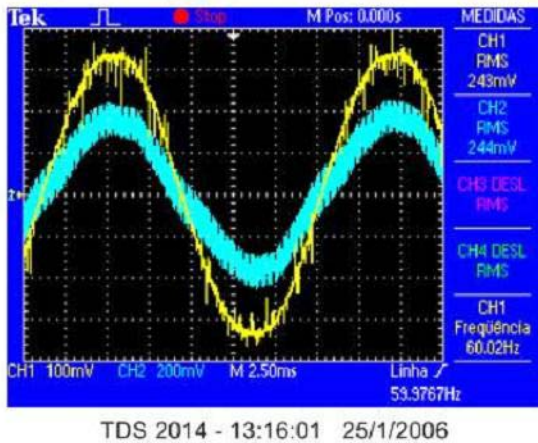


Figura 15 – Topologia Ohnishi Modificada: Tensão (Ch1) e corrente (Ch2) monofásicas

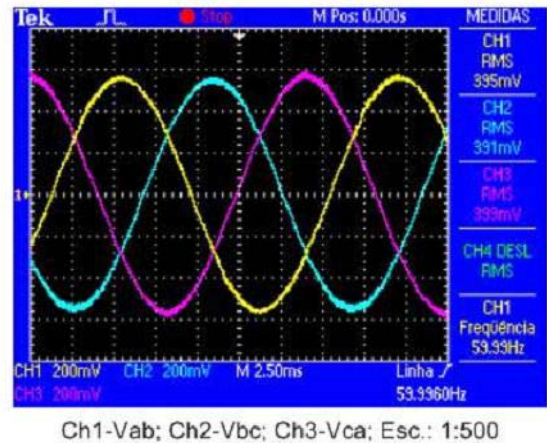


Figura 16 – Topologia Ohnishi Modificada: Tensões trifásicas (filtradas) no motor

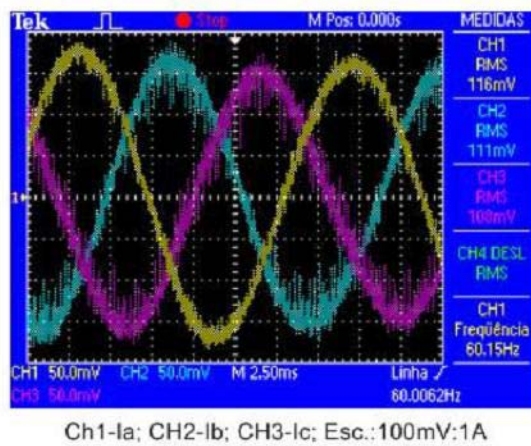


Figura 17 – Topologia Ohnishi Modificada: Correntes no motor

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Foram apresentadas neste artigo as topologias do conversor Monotri para eletrificação rural e para acionamento de motores. As suas funcionalidades englobam a conversão de um sistema de fase monofásico em um sistema de fase trifásico com neutro, realizando o controle do fator de potência da sua entrada e a regulação das tensões trifásicas de saída. Além disso, possui a capacidade de operar sob condições severas quando da ocorrência de variações de tensão na sua entrada.

A escolha da topologia mais adequada para a aplicação rural do Monotri foi feita em uma etapa anterior sendo o foco deste trabalho a montagem do protótipo. Os resultados obtidos mostraram a capacidade deste protótipo em realizar as funcionalidades para as quais foi projetado.

Para o Monotri destinado a acionamento de motores foram montadas três topologias, também previamente selecionadas, para testes. Todas elas mostraram resultados satisfatórios.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 N. Mohan, T. M. Undeland, and R. J. Ferraro, “Sinusoidal Line Current Rectification with a 100 kHz B-SIT Step-Up Converter”, in 15th Annual IEEE PESC, Conf. Rec., 1984, pp.92-98.

2 Prasad N. Enjeti, Ashek Rahman and Ranjit Jakkli, “Economic Single-Phase to Three-Phase Converter Topologies for Fixed and Variable Frequency Output”, IEEE Trans. on Power Electron. vol. 8, no. 3, pp. 329-335, July 1993.

- 3 Prasad N. Enjeti and Ashek Rahman, "A New Single-Phase to Three-Phase Converter with Active Input Current Shaping for Low Cost ac Motor Drives", IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 29, no.4, pp.806-813, July/August 1993.
- 4 John C. Salmon, "Circuit Topologies for PWM Boost Rectifiers Operated from 1-phase and 3-phase AC Supplies and Using either Single or Split DC Rail Voltage Outputs", in Conf. Rec. IEEE-APEC Annu. Meeting, 1995, vol. 1, pp. 473-479.
- 5 S. Manias, P. D. Ziogas, "An SMR topology with suppressed DC link components and predictive line current waveshaping," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 23, no. 4, 1987, p.: 644-653.
- 6 Douglas, H; Malengret, M. Symmetrical PWM with a split-capacitor singlephase to three-phase converter for rural electrification. IEEE ISIE Proceedings, 1998. p.: 289-293.
- 7 Larsen, J. S.; Jespersen, K.; Pedersen, M. R; Blaabjerg, F. Control of a complete digital-based component-minimized single-phase to three-phase AC/DC/AC converter. IECOM, 1998. p.: 618-624.
- 8 Dewan, S. B.; Showleh, M. A novel static single-to three-phase converter. IEEE Trans. on Magnetics, vol. Mag-17, no. 6, 1981. p.: 3287-3289.
- 9 Broeck, H. W. V. D.; Wyk, J. D. V. A comparative investigation of a three-phase induction machine drive with a component minimized voltage-fed inverter under different control options. IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-20, no. 2, 1984, p.: 309-320.
- 10 Tshivhilinge, E. N.; Malengret, M. A practical control of a cost reduced single phase to three phase converter. IEEE Transaction Industry Applications, 1998, p.: 445-449.
- 11 Richard Tymerski, Vatché Vorpérian, Fred C. Y. Lee, and William T. Baumann, "Nonlinear Modeling of the PWM Switch", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 4, no. 2, April 1989, pp. 225-233.
- 12 R. B. Ridley, "Average Small-Signal Analysis of the Boost Power Factor Correction Circuit", Proceedings of the Virginia Power Electronics Center Seminar, Blacksburg, VA, September 25-27, 1989, pp. 108-120.
- 13 Ramesh Srinivasan and Ramesh Oruganti, "A Unity Power Factor Converter Using Half-Bridge Boost Topology", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, no. 3, May 1998, pp. 487-500.
- 14 K. Thiyagarajah, V. T. Ranganathan, and B. S. Ramakrishna Iyengar, "A High Switching Frequency IGBT PWM Rectifier/Inverter System for AC Motor Drives Operating from Single Phase Supply", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.6, no.4, October 1991.
- 15 Maria D. Bellar, B. K. Lee, B. Fahimi and M. Ehsani, "An AC Motor Drive with Power Factor Control for Low Cost Applications", IEEE APEC'01, Vol. 1, pp 601-607, Anaheim, CA, 2001.
- 16 W. Leonhard, Control of Electrical Drives, 2nd edition, Springer, 1997.