

Desenvolvimento de Conversores Estáticos Monofásicos para Trifásicos Aplicados em Acionamento e Eletrificação Rural

M. Aredes, COPPE/UFRJ, R.M. Fernandes, COPPE/UFRJ, U. A. Miranda, COPPE/UFRJ, V. Petersen, CERJ, A.C.M. Araújo, CERJ

Resumo- Este artigo apresenta o Conversor Estático Monofásico-Trifásico (MONOTRI), aplicável à eletrificação rural. Suas funções são prover energia elétrica trifásica a partir de uma rede de distribuição monofásica, controlando o fator de potência do lado monofásico e entregando uma energia trifásica, com neutro, de forma regulada, mesmo sob ocorrências de variações momentâneas de tensão (VTCDs). O artigo aborda a modelagem digital da topologia do MONOTRI para simulação em *software* e apresenta os resultados experimentais da sua implementação sob a forma de um protótipo laboratorial. Vale destacar que o MONOTRI com sua capacidade de melhorar a qualidade do fornecimento da energia, além de contribuir para a melhoria da imagem da concessionária perante a população rural, se enquadra na filosofia do programa “Luz para Todos”, lançado pelo governo federal em 2003, no que diz respeito ao desenvolvimento sócio-econômico das comunidades, ajudando a diminuir o êxodo rural, gerando empregos e respeitando o meio-ambiente.

Palavras-chave— Conversão de fases, conversores estáticos, eletrificação rural, eletrônica de potência, qualidade de energia.

I. INTRODUÇÃO

Redes monofásicas são típicas de áreas rurais por conduzirem a uma considerável redução de custos para as concessionárias (cerca de até 40% em relação às trifásicas). Contudo, não são adequadas ao desenvolvimento de atividades comuns a este tipo de região – como a agricultura –, visto que não permitem o uso de utensílios e maquinário trifásicos, de maior potência e rendimento. Além disso, limitam a qualidade de vida das comunidades locais e implicam problemas técnicos relacionados à qualidade de energia para a concessionária, principalmente devido a baixos valores de tensão e fator de potência. Atualmente, as soluções adotadas

não resolvem estes problemas simultaneamente e introduzem fraquezas no sistema, reduzindo suas relações custo-benefício.

Denomina-se MONOTRI uma estrutura bastante peculiar de conversor eletrônico. Este dispositivo sintetiza tensões trifásicas equilibradas a partir de uma rede monofásica. Em sistemas rurais, estes conversores podem ser empregados para disponibilizar tensões trifásicas, quando o consumidor dispõe apenas de alimentação monofásica. Uma das vantagens da adoção desta estratégia é a possibilidade de utilização de motores de indução trifásicos em substituição aos ruidosos motores monofásicos. O MONOTRI permite ainda controlar a amplitude das tensões de saída, deixando o consumidor imune a variações de tensão de curta duração (VTCD's). Além disso, proporciona outros benefícios como a melhoria do fator de potência e da regulação de tensão.

O MONOTRI, de natureza totalmente inovadora para o mercado atual, resolve simultaneamente os problemas da concessionária – melhorando a qualidade de energia da sua rede rural monofásica com uma solução alternativa de custos relativamente menores – e da comunidade rural – fornecendo uma energia elétrica trifásica regulada. Desta forma, o MONOTRI apresenta-se como uma solução que visa contribuir para o desenvolvimento sócio-econômico das comunidades rurais e isoladas, ajudando a diminuir o êxodo rural, gerando empregos e respeitando o meio-ambiente.

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

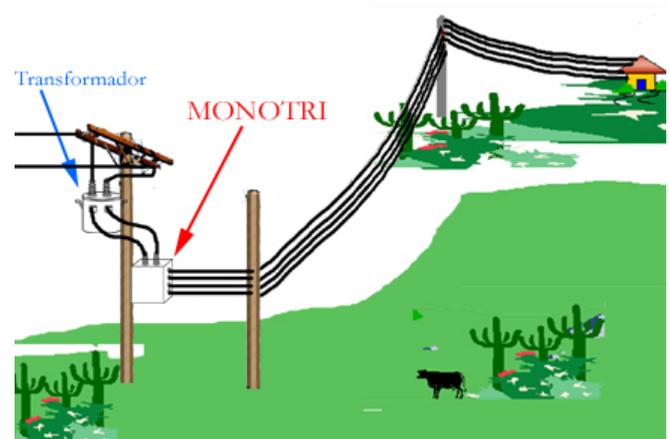


Figura 1: Arquitetura da solução MONOTRI para eletrificação rural.

R. M. Fernandes e U.A. Miranda estão, respectivamente, em seus estudos de doutorado e mestrado em engenharia elétrica na COPPE/UFRJ - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. (e-mail: rodrigo@coe.ufrj.br, ulisses@coe.ufrj.br).

M. Aredes é professor doutor da COPPE/UFRJ – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. (e-mail: aredes@ufrj.br)

V. Petersen, A. C. M. Araújo são funcionários da CERJ – Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro – RJ, rua Praça Leoni Ramos, no 1, CEP 24210-205, Niterói, RJ, Brasil. (e-mail:petersen@cerj.com.br, acma@cerj.com.br).

O conteúdo deste trabalho está submetido para apresentação no XVI Seminário Nacional De Distribuição De Energia Elétrica (SENDI'2004).

II. MODELO DIGITAL DO MONOTRI

O desenvolvimento de conversores MONOTRI, considerando o atendimento de consumidores rurais trifásicos a partir de sistemas monofásicos, deve considerar os seguintes aspectos principais:

- ✓ Melhoria da qualidade da energia elétrica – redução da distorção harmônica da corrente (THD); melhoria da regulação de tensão; melhoria do fator de potência; capacidade para suportar variações de tensão de curta duração CA monofásica (VTCD's);
- ✓ Simplificação dos circuitos dos conversores eletrônicos – redução do custo total do equipamento, do número de componentes, do volume e do peso.

A. Arquitetura Genérica

A Figura 2 apresenta a especificação geral do conversor MONOTRI para eletrificação rural. Os pontos A e N correspondem aos terminais de um ramal monofásico com neutro (retorno metálico). A tensão V_{AN} (disponível entre os terminais A e N) é aplicada no primário do transformador monofásico, que tem relação de transformação igual a 7967/220 V. O secundário do transformador possui três terminais, onde podem ser obtidas tensões de 110 e 220 V. O primário e secundário do transformador são aterrados e apresentam cerca de 5Ω de resistência de aterramento (valor típico).

A tensão de 220 V é aplicada nos terminais de entrada de um retificador monofásico, sintetizando a tensão de corrente contínua (CC). A amplitude desta tensão pode ser modificada pela ação de um conversor CC/CC boost. A partir da tensão CC, o inversor gera tensões trifásicas equilibradas que serão utilizadas no atendimento das cargas trifásicas e monofásicas de potências diversas. Portanto, o conversor deverá apresentar desempenho adequado mesmo suprindo cargas desequilibradas.

B. Definição da topologia do MONOTRI

Para permitir a simulação digital do MONOTRI rural foi necessário o desenvolvimento de modelos digitais para os diversos elementos de uma rede de distribuição rural típica, além dos próprios modelos para o MONOTRI.

A Figura 3 apresenta o modelo digital de tal rede de distribuição, utilizado na análise do desempenho das diversas topologias MONOTRI.

Em todas as simulações foi utilizado um modelo padrão para a rede CA supridora, que considera as principais características de um sistema de eletrificação rural típico, tais como:

- ✓ **Subestação abaixadora:** potência de curto-circuito trifásico (40 MVA), barramento (13,8 kV);
- ✓ **Ramal 1:** ramal bifásico formado por dois condutores 4 AWG, com 30 km de extensão, onde será conectado o Mono-Tri;
- ✓ **Ramal 2:** ramal bifásico formado por dois condutores 4 AWG, com 4 km de extensão, para simulação de defeitos que provocam afundamentos de tensão no Ramal 1;
- ✓ **Transformador monofásico:** tensão de entrada 13,8 kV; tensão de saída 220V (± 110 V); potência nominal 15 kVA; reatância de dispersão de 5% na base do equipamento;
- ✓ **Estágio retificador:** conversor CA/CC (controlado ou não, dependendo da topologia);
- ✓ **Estágio elevador (boost):** conversão CC/CC, para elevação da tensão CC na entrada do inversor (dependendo da topologia);
- ✓ **Estágio inversor:** conversor CC/CA, com saída trifásica com neutro; requisitos de saída (220 V entre fases, 60 Hz, 15 kVA); cargas desequilibradas.

O ramal principal (FEED 1 na Figura 3) é formado por dois condutores 4 AWG e tem 30 km de extensão. Os condutores estão a 10 metros do solo, espaçados de 1 metro. Utilizou-se um modelo digital detalhado para a representação do ramal, que considera a dependência dos parâmetros elétricos do ramal com a frequência.

Nos terminais do Ramal 1, conecta-se um transformador monofásico de 15 kVA – 13800/220 V e de reatância de dispersão igual a 5%. No secundário deste transformador podem ser obtidas tensões de 110 e 220 V, dependendo do tipo de conexão utilizada. A tensão V_{ab} disponível nos terminais do transformador monofásico é aplicada nos terminais de entrada do conversor MONOTRI.

Diversas topologias de conversores monofásico-trifásicos já foram propostas na literatura técnica e científica [2-6]. 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 e simulações computacionais, a topologia adotada (Figura 4) foi a que utiliza o retificador PWM *boost* completo com inversor a quatro pernas. Além de todas as funcionalidades de correção de fator de potência, controle do elo CC e controle 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) em série, tornando menor o custo da topologia, mesmo com um número maior de componentes ativos.

C. O circuito de controle

Para controlar as chaves estáticas da topologia do MONOTRI é necessário um circuito de controle que receba, como entrada, grandezas elétricas e forneça, como saída, sinais de disparo para controlar a abertura ou fechamento das chaves.

A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos do

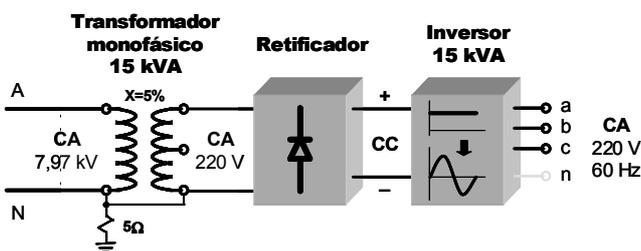


Figura 2: Arquitetura genérica do conversor MONOTRI para eletrificação rural.

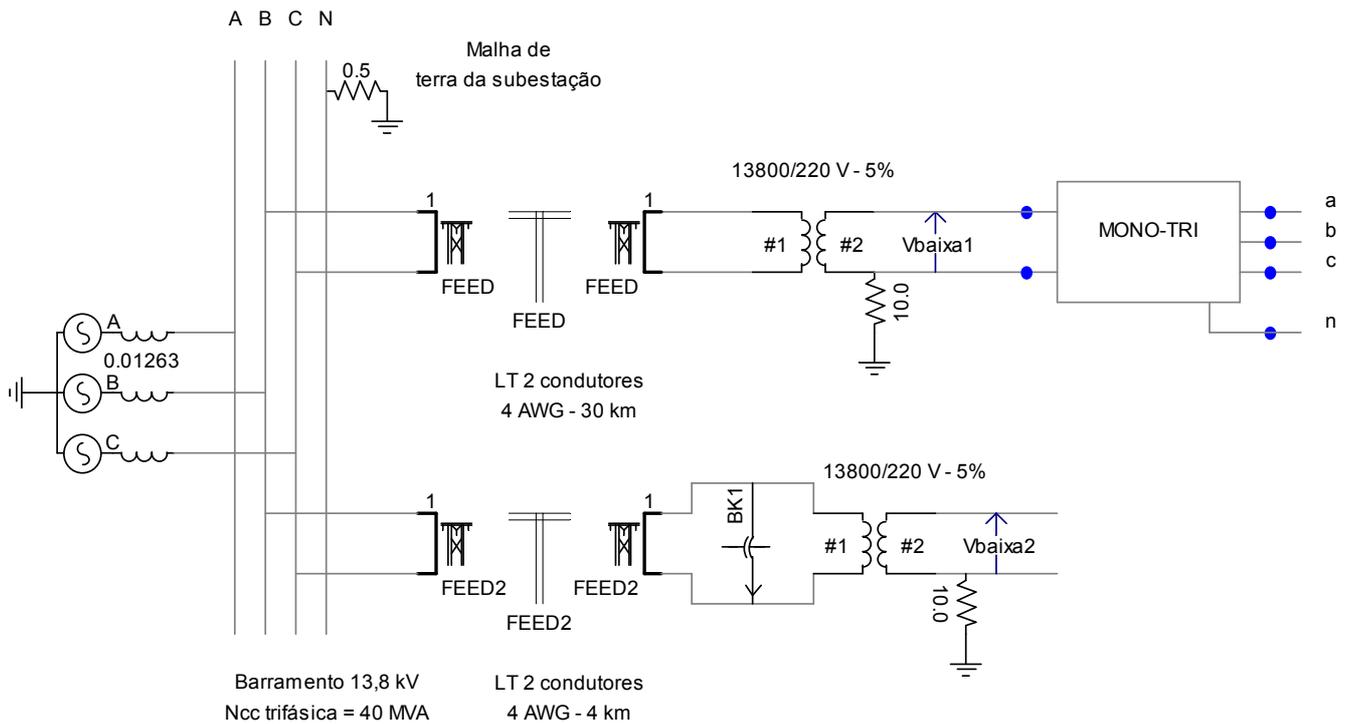


Figura 3: Sistema utilizado nas simulações digitais: conversor MONOTRI e rede CA supridora.

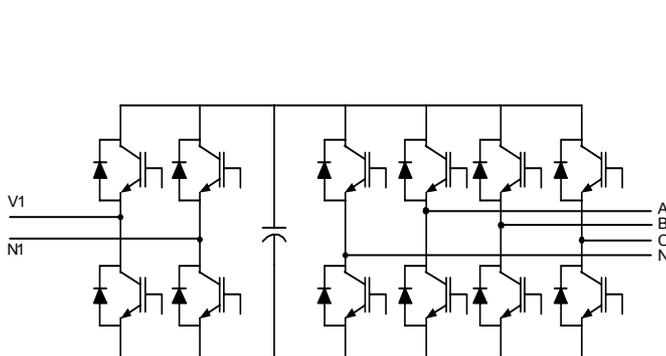


Figura 4: Topologia adotada para o MONOTRI. Retificador controlado e inversor a quatro pernas fornecendo o neutro.

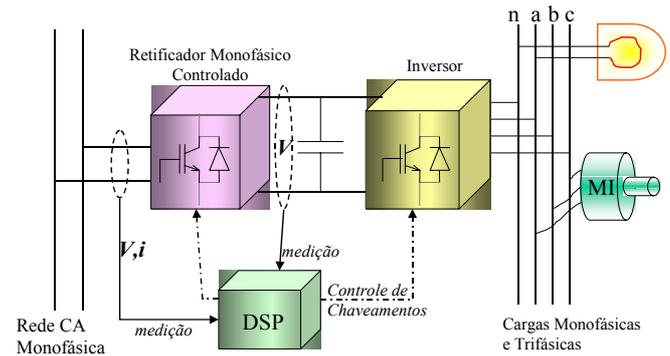


Figura 5: Diagrama de blocos do MONOTRI com o circuito de controle e grandezas medidas.

MONOTRI com o circuito de controle e as grandezas elétricas medidas. Na sua implementação final, o circuito de controle será realizado por um microcontrolador DSP (Digital Signal Processor), identificado na mesma figura.

O circuito de controle pode ser dividido em duas partes fundamentais: o circuito de controle do retificador e o circuito de controle do inversor.

O circuito de controle do retificador utiliza as grandezas de tensão e corrente da entrada monofásica e a tensão do elo CC para realizar ao mesmo tempo o controle do fator de potência e o controle da tensão do elo CC. Já o controle do inversor é realizado aplicando-se uma das técnicas PWM já bastante conhecida na literatura, seja ela seno-PWM ou vetorial, baseando-se no nível de tensão do elo CC, fixado pelo controle do retificador, e na referência de amplitude para as tensões de saída.

Dentre as estratégias de controle conhecidas para retificadores pwm *boost* completo, o controle por modo de corrente é a mais utilizada.

O diagrama de blocos do controle por modo de corrente é mostrado na Figura 6(a). O resultado da comparação de V_{cc}

com a referência $RefV_{cc}$ 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 que será comparada com I_s , resultando no sinal de erro da corrente (erroI). A partir desse sinal é feita a estratégia de chaveamento por banda de histerese, como mostrado na Figura 6(b).

O chaveamento por banda de histerese consiste em limitar o sinal de erro da corrente dentro em uma faixa definida. Os pulsos de chaveamento gerados por esta estratégia não possuem uma frequência fixa, fato que dificulta a sua implementação em DSP. Uma variação deste método é o Controle On-Off Sincronizado [7]. Este método consiste em fixar o período de comparação limitando a frequência de chaveamento. Como consequência, a faixa de variação da corrente não será fixa.

O PLL é um componente fundamental para o desenvolvimento da estratégia de controle. A partir de um sinal se-

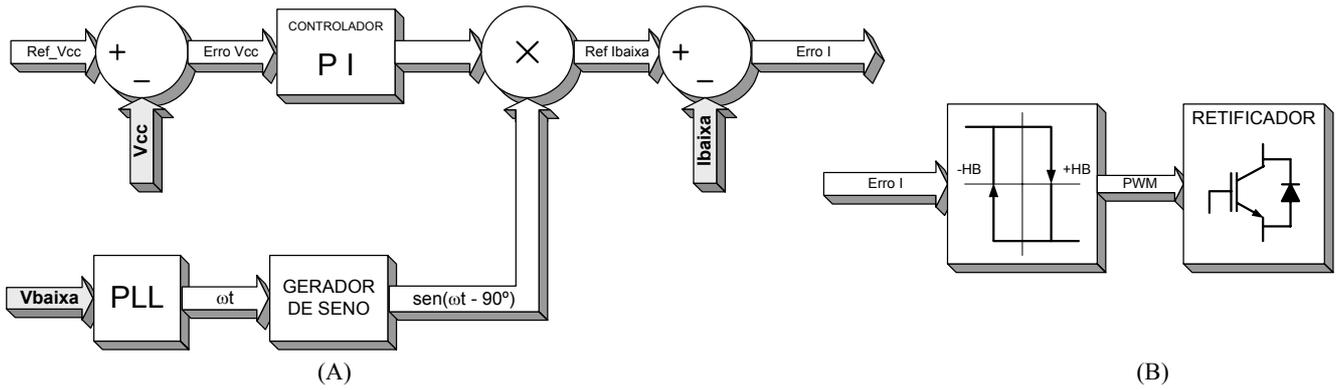


Figura 6: (a) controle por modo de corrente; (b) Chaveamento PWM por banda de histerese.

noidal de entrada ele é capaz rastrear continuamente seus valores de frequência e fase, mesmo que este sinal contenha alto conteúdo harmônico. O circuito utilizado é consiste no PLL monofásico [8] apresentado na Figura 8, que utiliza a Teoria-pq [9].

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

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

As amplitudes das tensões resultantes na saída são dadas por:

$$V_{io} = m_a \frac{V_{cc}}{2} = \frac{V_{cc}}{2} \quad (2)$$

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.

D. Resultados das simulações computacionais

O modelo digital da topologia adotada para o MONOTRI foi implementado no programa de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC, conforme ilustra a Figura 7. Pode-se verificar que foi adicionado um filtro passa-baixa na saída do MONOTRI com o objetivo de filtrar os harmônicos de chaveamento do inversor PWM.

As simulações realizadas baseiam-se no esquemático da Figura 3, previamente descrito. Elas mostram o desempenho do MONOTRI, localizado no final do ramal 1 (após o transformador de distribuição), antes e após o surgimento de um VTCD entre 0,7 e 1,0 s, causado por um curto-circuito remoto no ramal 2 conectado ao alimentador de 13,8 kV.

A Figura 8 mostra a tensão do barramento CC, durante toda a simulação. As correntes nas três fases do inversor e a tensão fase-neutro V_{an} estão mostradas na Figura 9.

A Figura 10 apresenta a corrente na entrada do retificador (I_{baixa}) e o sinal de referência (I_{ref}), momentos antes da ocorrência da VTCD, numa janela de aproximadamente 5 ciclos. Analisando-se esta figura, percebe-se que o fato de a corrente na entrada do retificador estar seguindo a corrente de referência implica em um fator de potência próximo a unidade, visto que a corrente de referência (I_{ref}) é calculada

de forma a estar sempre em fase com a tensão da rede monofásica. A Figura 11 mostra o comportamento da mesma grandeza (I_{baixa}) durante todo o período de simulação.

A Figura 12 apresenta o valor eficaz da tensão no secundário do transformador e o valor eficaz da tensão fase-fase, em pu, na saída do inversor. Observa-se na figura que esta tensão não é afetada pela ocorrência do afundamento de tensão (VTCD). A mesma afirmação pode ser feita para a tensão fase-neutro V_{an} , cuja amplitude condiz com o valor esperado.

Analisando todos esses resultados de simulação verificou-se a adequação da topologia do MONOTRI para eletrificação rural, controlando o fator de potência da entrada do equipamento bem como a regulação da tensão trifásica entregue para as cargas.

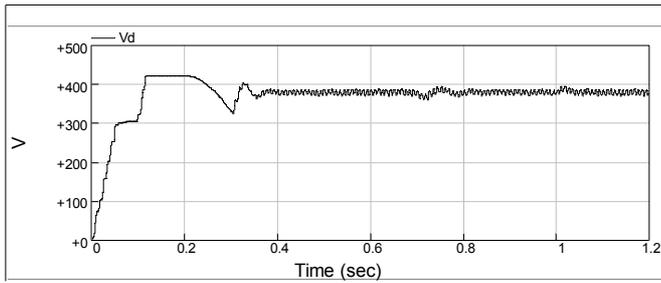


Figura 8: Tensão do barramento CC.

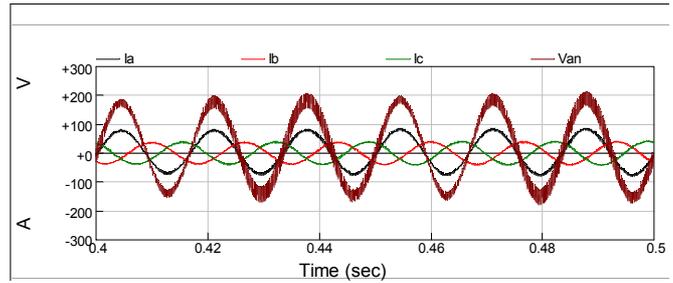


Figura 9: Correntes nas fases do inversor e tensão fase-neutro Van.

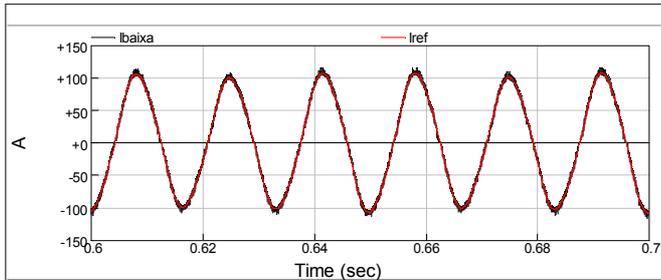


Figura 10: Corrente na entrada do retificador (Ibaixa) e sinal de referência correspondente (Iref).

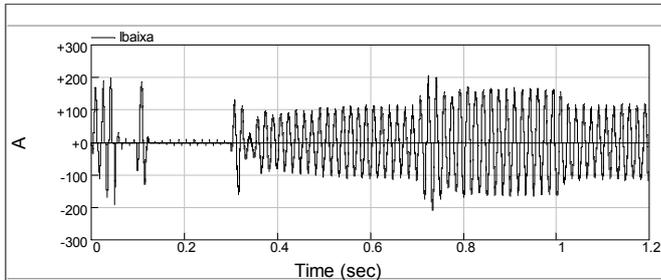


Figura 11: Corrente na entrada do retificador (Ibaixa).

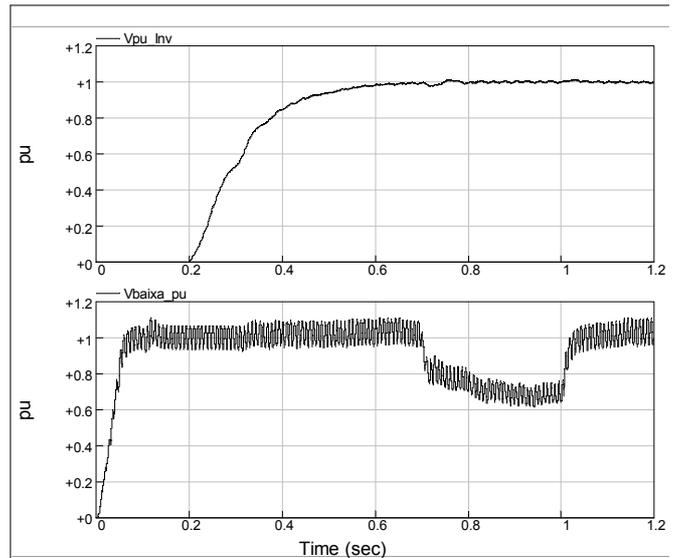


Figura 12: Valor eficaz da tensão fase-fase, em pu, na saída do inversor (acima);

Valor eficaz da tensão na entrada do retificador (abaixo).

A. Resultados Experimentais

O protótipo de bancada implementado foi testado para as especificações apresentadas na Tabela I.

TABELA I
ESPECIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO PARA TESTES PRELIMINARES

Tensão monofásica de entrada	Vs	220 V / 60 Hz
Tensão trifásica de saída	Va,b,c	127 V / 60 Hz
Frequência de chaveamento	fs	10 kHz
Indutância de entrada	Ls	22 mH
Carga na fase A	Pa	200 W
Carga na fase B	Pb	100 W
Carga na fase C	Pc	200 W

A Figura 15 mostra os valores de tensão e corrente na entrada monofásica do retificador e a tensão regulada do elo CC. Na Figura 15 (a) a tensão de entrada foi ajustada em 190V e na Figura 15 (b) em 220V. Em ambos os casos a tensão do elo CC foi regulada na referência e o fator de potência na entrada é aproximadamente unitário, demonstrando o correto funcionamento do controle da tensão do elo CC, bem como do controle da correção do fator de potência. O espectro harmônico da corrente é mostrado na Figura 16, com THD de 16%. Estes resultados foram obtidos nos testes preliminares do equipamento, portanto, ainda serão realiza-

das otimizações para enquadrar o valor do THD de corrente dentro dos valores sugeridos pela norma IEE-519. Além disso, nos testes utilizaram-se cargas bem abaixo do valor nominal (aproximadamente 3%) e, de acordo com o método do controle de corrente utilizado, quanto maior o valor eficaz da corrente menor será a distorção harmônica da mesma.

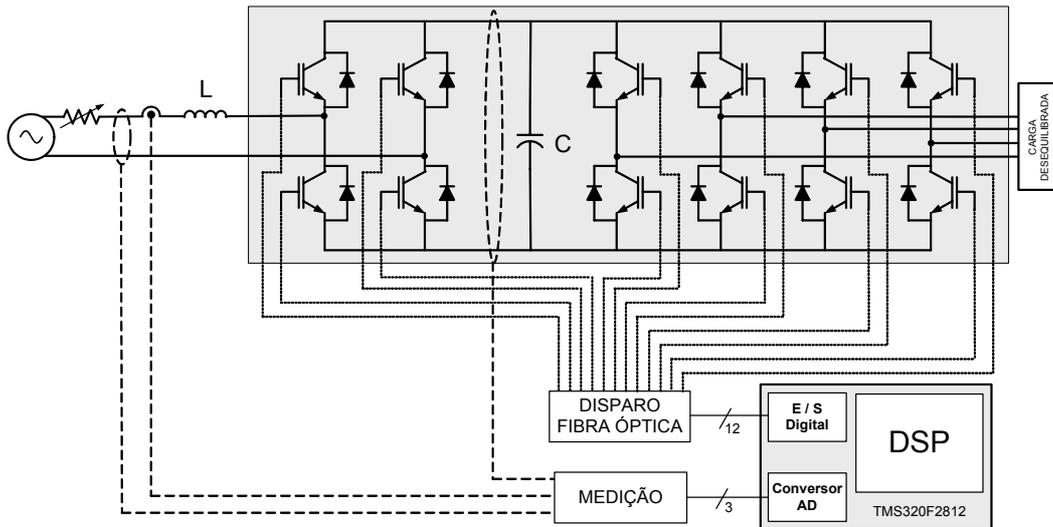


Figura 13: Diagrama da bancada do MONOTRI

As tensões fase-neutro da saída do inversor, juntamente com a tensão regulada do elo CC, são mostradas na Figura 17(a). O espectro harmônico da tensão trifásica é mostrado na Figura 17(b).

IV. CONCLUSÕES

Apresentou-se o conversor MONOTRI para eletrificação rural. 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 VTCD's na sua entrada.

A escolha da topologia mais adequada para a aplicação rural do MONOTRI deu-se através da pesquisa bibliográfica e análises através do software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC. Os resultados das simulações mostraram a capacidade da topologia escolhida em conjunto com a estratégia de controle em realizar as funcionalidades para as quais foi projetado.

Com base no modelo digital projetado e simulado, implementou-se um protótipo laboratorial (de bancada) do MONOTRI. Os testes preliminares demonstraram o correto funcionamento das estratégias de controle implementadas no DSP. Algumas otimizações ainda são necessárias, principalmente no que diz respeito à distorção harmônica da corrente, que para os testes apresentados foram elevadas.

Os testes foram realizados sob condição de carga bem abaixo da nominal (3%). Este fato tem influência no elevado

valor do THD de corrente. Portanto, ainda serão necessários testes em campo, sob condições de carga nominal, para avaliar o comportamento do MONOTRI em situações reais.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOHAN, N. & UNDELAND, T. M. & ROBINS, W. P. *Power Electronics Converters, Applications, and Design*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [2] ENJETI, Prasad N. & RAHMAN, Ashek & JAKKLI, Ranjit. *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] SALMON John C. *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*. Conf. Rec. IEEE-APEC Annu. Meeting, 1995, vol. 1, pp. 473-479.
- [4] 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.
- [5] SRIRAM, V. B. & SENGUPTA, S. & PATRA, A. *Control of a transistored single-phase bridge converter operated in the rectifier mode*. Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2: 353 – 358.
- [6] STIHI, O. & OOI, B. T. *A single-phase controlled-current pwm rectifier*. IEE Transactions on Power Electronics 3(4): 453–459.
- [7] LEONHARD, W. *Control of Electrical Drives*. 2 edn, Springer, (1997).
- [8] MIRANDA, Ulisses A. & SILVA NETO, José L. & BELLAR, Maria D. & AREDES, Maurício & FERNANDES, Rodrigo M. *Implementação em DSP de um conversor monofásico-trifásico para eletrificação rural*. Anais do Congresso Brasileiro de Automática, 2004.
- [9] AKAGI, H. & KANAZAWA, Y. & NABAE, A. *Generalizes theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits*. IPEC - International Power Electronics Conf. pp. 1375–1386.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO,
CONTROLE E DISPARO

SISTEMA DE POTÊNCIA:
RETIFICADOR + INVERSOR



Figura 14: Protótipo do MONOTRI.

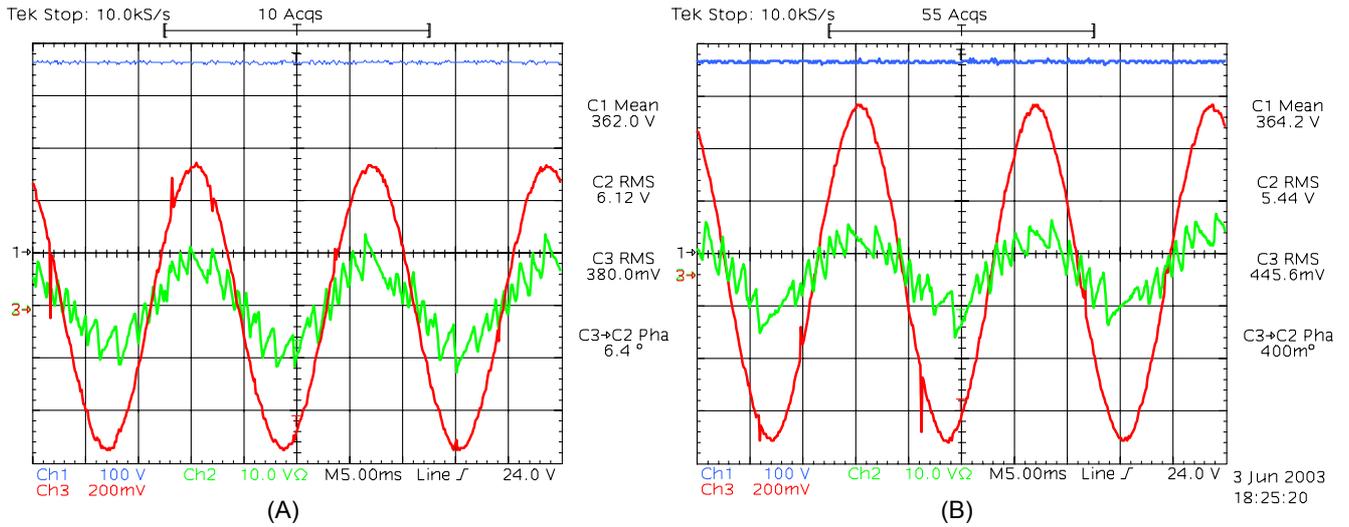


Figura 15: Tensão e corrente na entrada monofásica e tensão do elo CC. (Ch1: Vcc, Ch2: Is e Ch3: Vs)

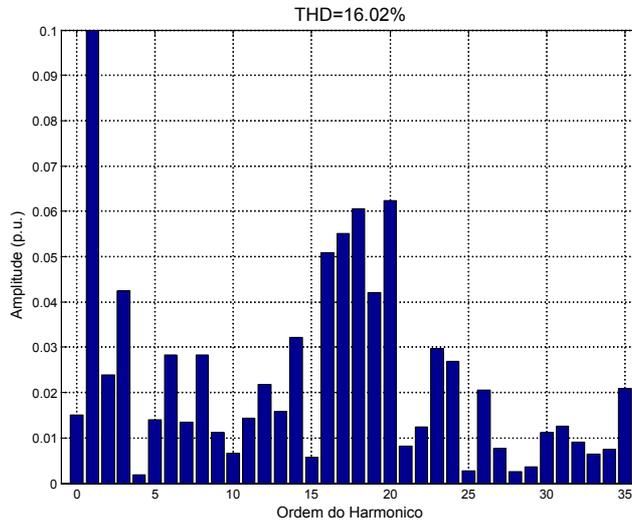


Figura 16: Espectro harmônico da corrente na entrada monofásica.

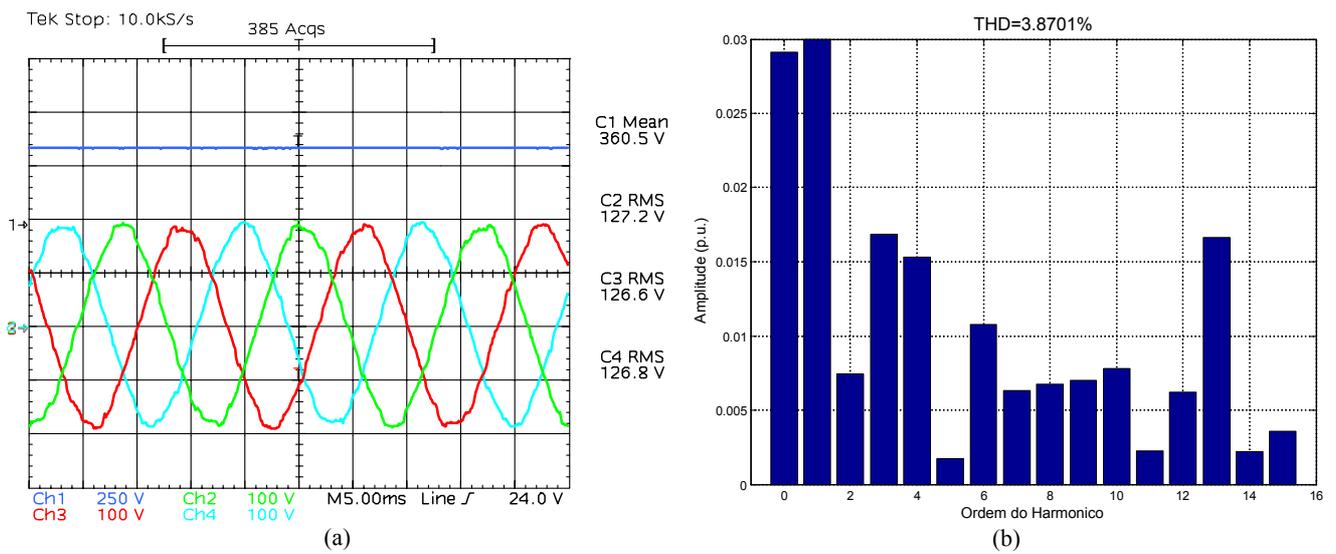


Figura 17: (a) Resultado experimental do inversor (Ch1: Vcc, Ch2: Van, Ch3: Vbn, Ch4: Vcn);
(b) Espectro harmônico da tensão de saída fase-neutro da fase A.