

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.

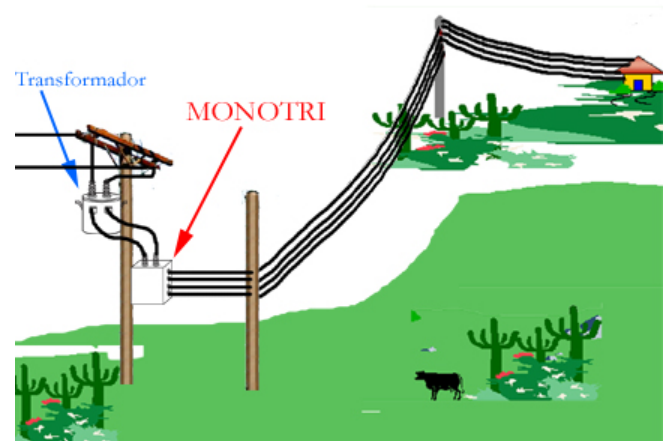


Figura 1: Arquitetura da solução MONOTRI para eletrificação rural.

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

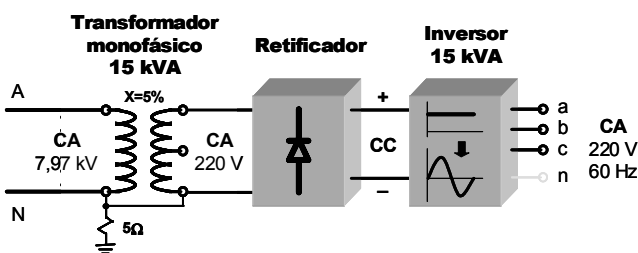


Figura 2: Arquitetura genérica do conversor MONOTRI para eletrificação rural.

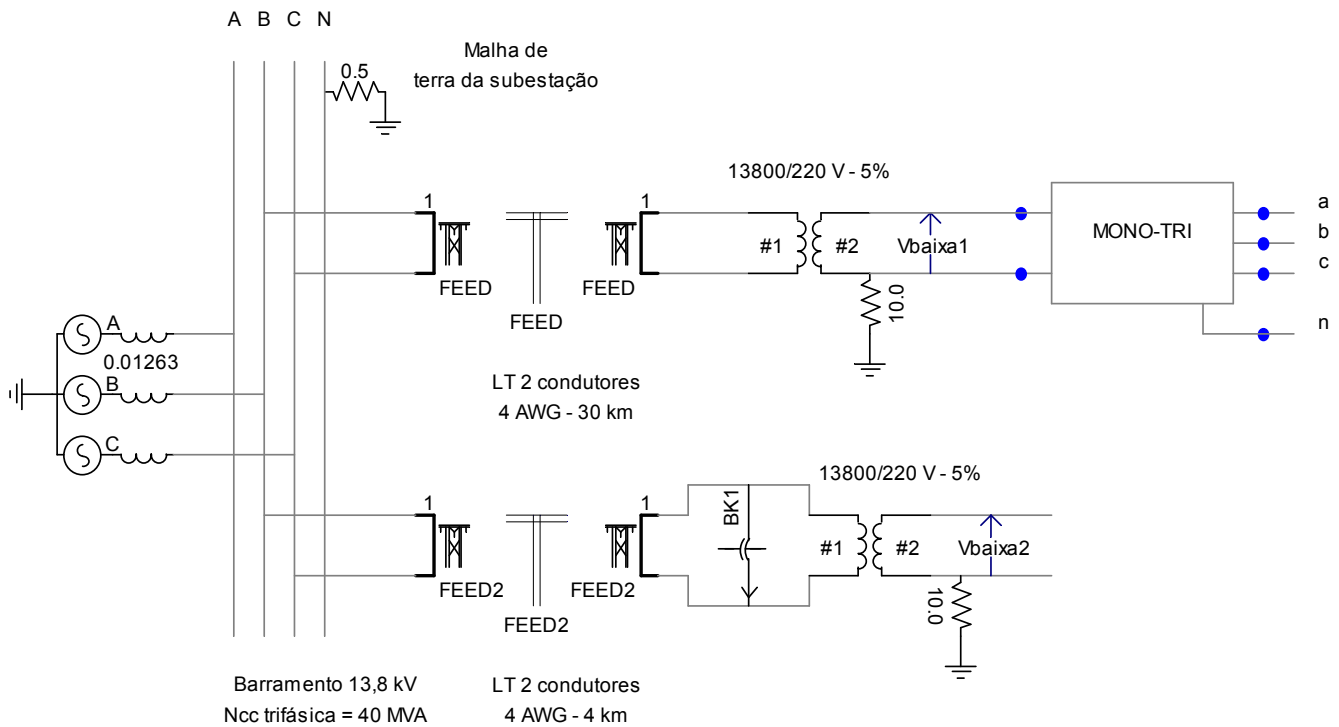


Figura 3: Sistema utilizado nas simulações digitais: conversor MONOTRI e rede CA supridora.

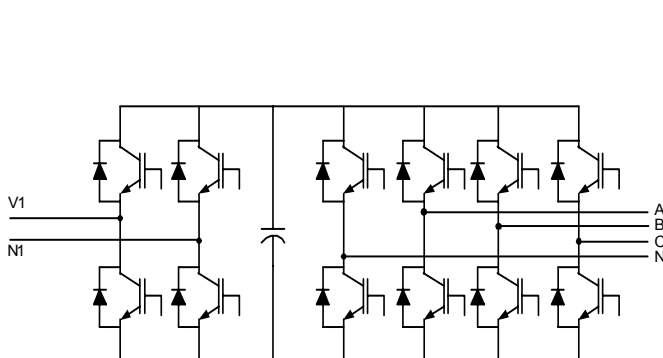


Figura 4: Topologia adotada para o MONOTRI. Retificador controlado e inversor a quatro pernas fornecendo o neutro.

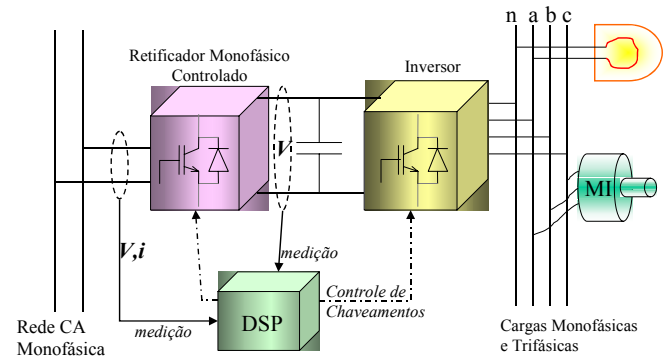


Figura 5: Diagrama de blocos do MONOTRI com o circuito de controle e grandezas medidas.

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 senoide de amplitude unitária com os mesmos valores de fase e frequência. A saída do controlador PI é multiplicada por esta senoide 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-

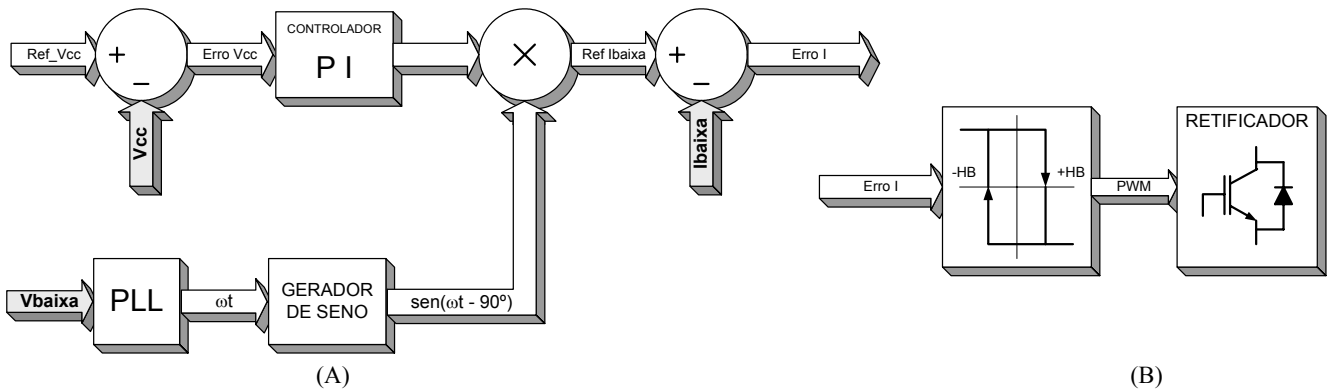


Figura 6: (a) controle por modo de corrente; (b) Chaveamento PWM por banda de histerese.

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.

III. O PROTÓTIPO LABORATORIAL

O circuito de potência do MONOTRI é composto, basicamente, de um módulo comercial de 2 inversores trifásicos a IGBT da SEMIKRON conectados em série pelo elo CC. Os IGBTs são comandados via sinais de fibra ótica que são enviados pelo DSP através de uma placa de conversão digital para ótico.

O controle do Mono-Tri foi implementado no DSP TMS320F2812 da TEXAS INSTRUMENTS. Este é um microprocessador de 32 bits com performance de até 150MIPS em ponto fixo, conversor AD de 12 bits, memória Flash e periféricos analógicos on-chip.

Todo o controle do MONOTRI está dentro de uma rotina de interrupção processada pelo DSP, cujo período define a frequência de chaveamento f_s e a taxa de amostragem do conversor analógico digital (AD). O timer foi programado para contar no modo up-down permitindo a geração do PWM simétrico. A chamada da rotina de interrupção é feita a uma frequência de 10kHz, e ocorre a cada underflow timer.

O diagrama de ligação da bancada do MONOTRI é mostrado na Figura 13. As duas leituras de tensão e a de corrente são entregues ao conversor AD através de um sistema de medição e condicionamento de sinal, que isola o circuito de potência e limita o sinal de entrada na faixa de 0 a 3volts.

O indutor colocado na entrada representa a indutância do transformador e na saída foi utilizada uma carga desequilibrada para que haja circulação de corrente pelo neutro.

A Figura 14 mostra a foto dos componentes do MONOTRI.

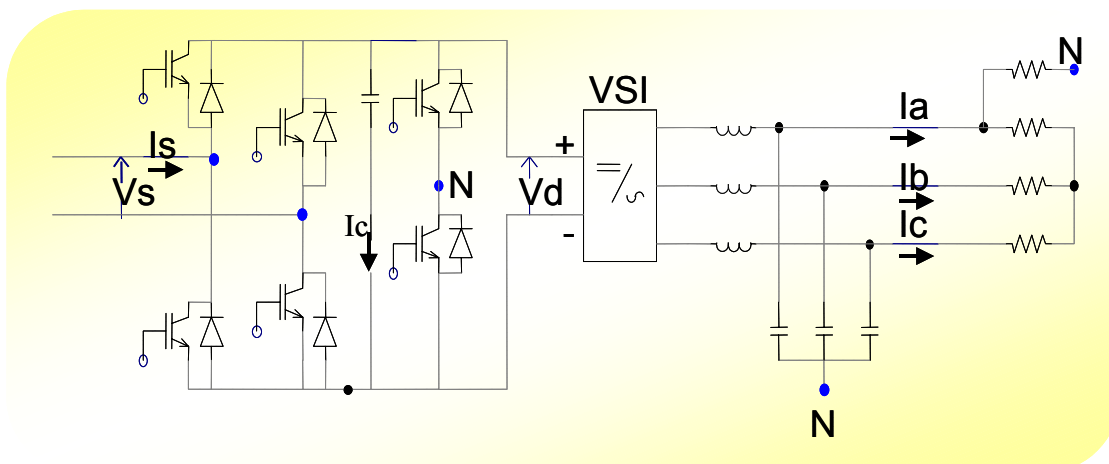


Figura 7: Arquitetura genérica do conversor MONOTRI para eletrificação rural.

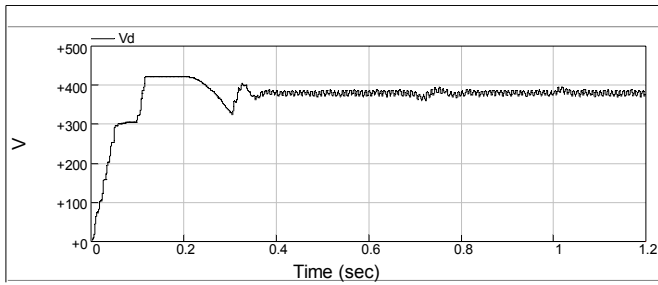


Figura 8: Tensão do barramento CC.

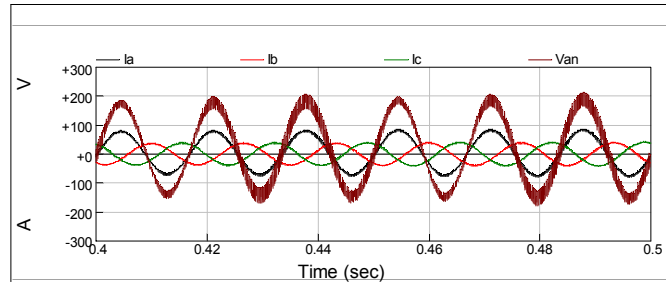


Figura 9: Correntes nas fases do inversor e tensão fase-neutro Van.

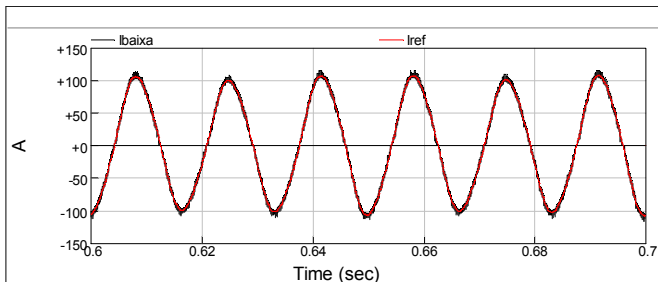


Figura 10: Corrente na entrada do retificador (Ibaixa) e sinal de referência correspondente (Iref).

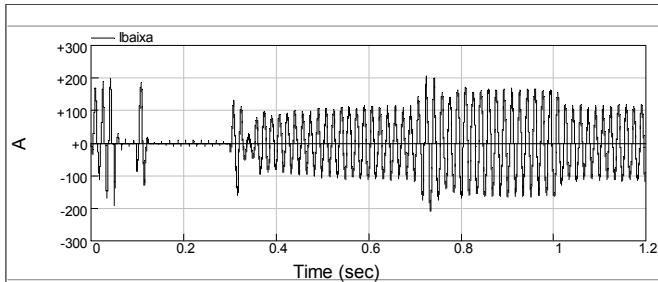


Figura 11: Corrente na entrada do retificador (Ibaixa).

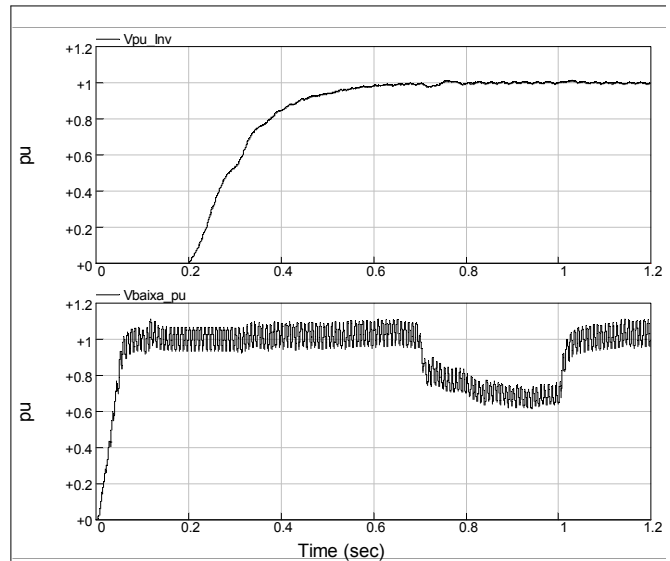


Figura 12: Valor eficaz da tensão fase-fase, em pu, na saída do inversor (acima);

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.

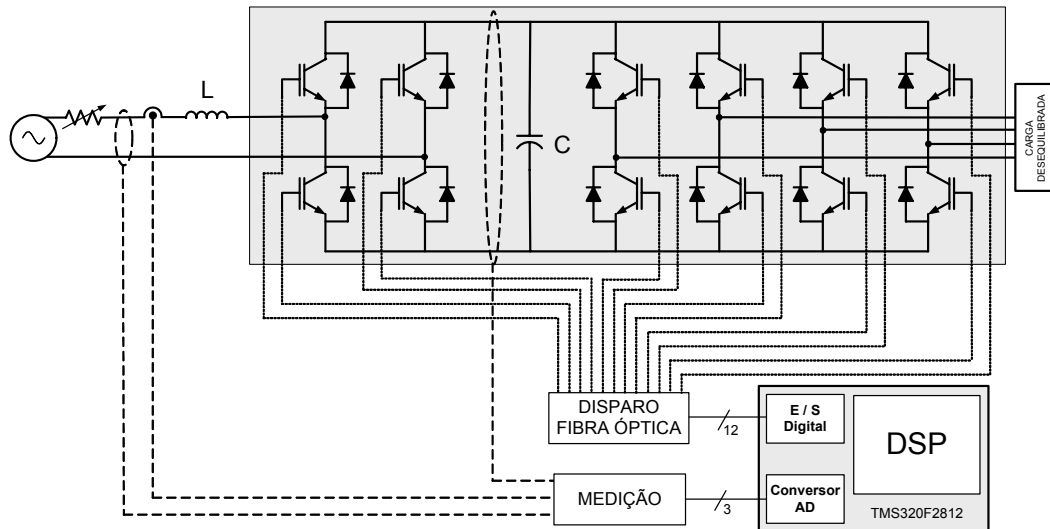


Figura 13: Diagrama da bancada do MONOTRI

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.

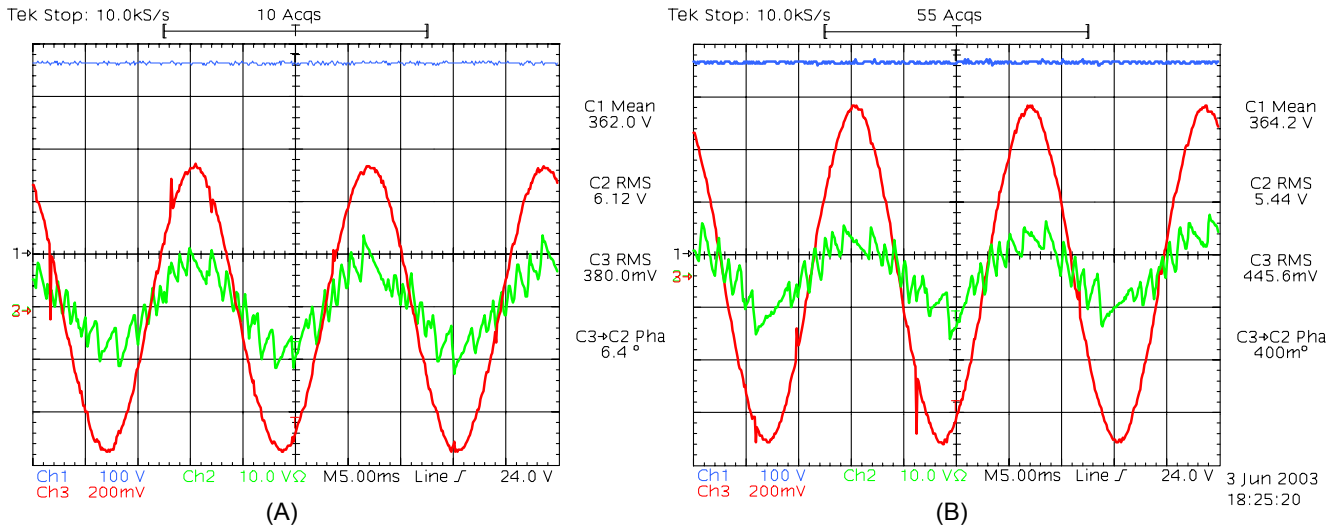


Figura 15: Tensão e corrente na entrada monofásica e tensão do elo CC. (Ch1: Vcc, Ch2: Is e Ch3: Vs)

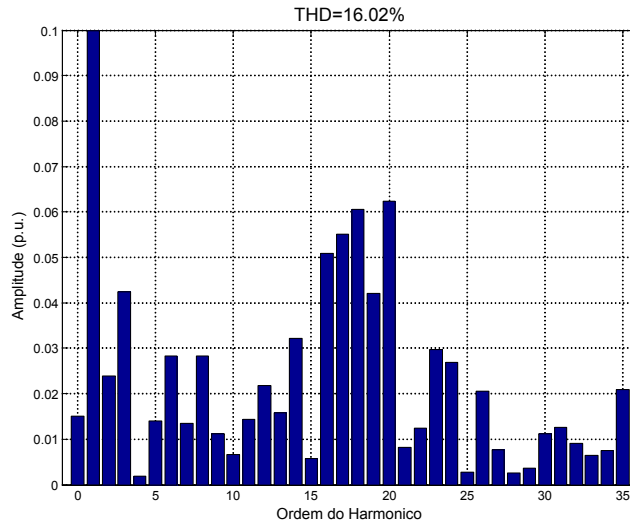


Figura 16: Espectro harmônico da corrente na entrada monofásica.

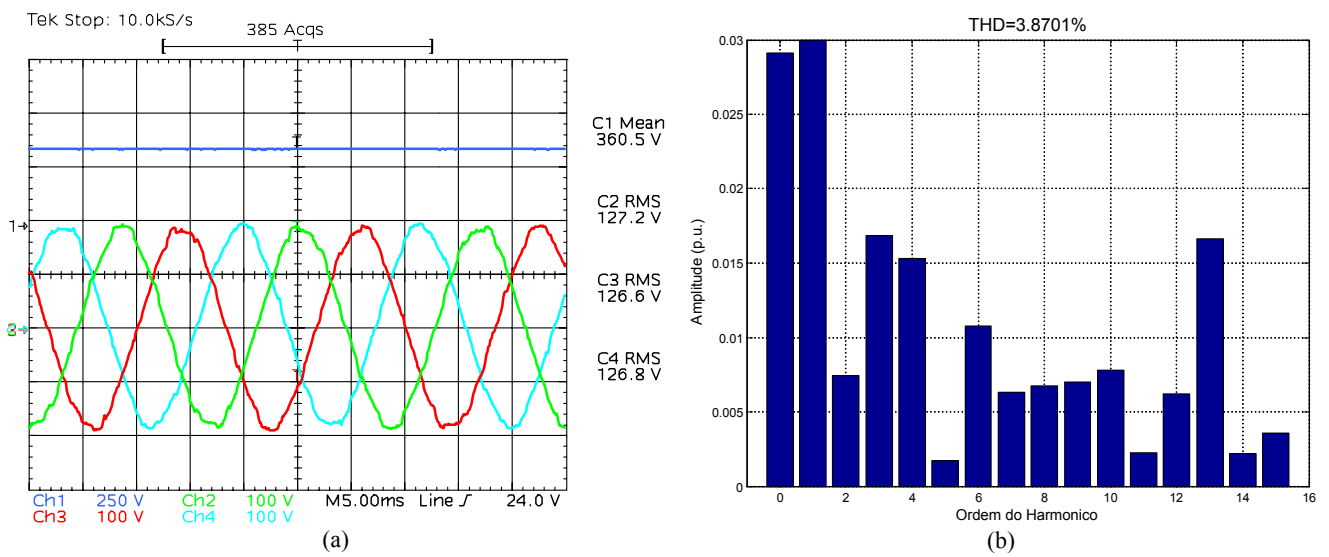


Figura 17: (a) Resultado experimental do inversor (Ch1: Vcc, Ch2: Van, Ch3: Vbn, Ch4: Vcn); (b) Espectro harmônico da tensão de saída fase-neutro da fase A.