

ESTUDO DE RETIFICADORES SEPIC TRIFÁSICOS COM ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA

Flabio Alberto Bardemaker Batista¹, Alessandro Gehlen², Jéssica Ramos Ribeiro³, João Antônio Cardoso⁴, Marcos Vinícius Dutra⁵, Roberto Vinicius Seidler⁶

Resumo: Este trabalho tem como objetivo o estudo de retificadores SEPIC trifásicos com elevado fator de potência utilizando técnicas de controle digital. Entre os principais problemas a serem abordados, considera-se as questões relacionadas com o rendimento dos conversores de energia, redução de peso e volume, baixa taxa de distorção harmônica para as correntes de entrada e elevado fator de potência. Estas características são bastante afetadas pela escolha do conversor de energia e pelos sistemas de controle e modulação que são os focos de estudo neste projeto. Neste aspecto, os conversores SEPIC se mostram como soluções atrativas por apresentarem estruturas de estágio único, e a possibilidade de atuarem como estruturas abaixadoras e elevadoras de tensão. Com isso, foram desenvolvidas atividades relacionadas com o projeto de um retificador visando a montagem e testes do estágio de potência e a realização das tarefas de programação dos sistemas de controle digital e modulação. Na etapa final do projeto será realizada a integração das diferentes partes do sistema e a implementação de um protótipo para verificação experimental dos conceitos estudados.

Palavras-chave: Qualidade de Energia. Conversores CA-CC. *Single-Ended Primary-Inductor Converter*.

Abstract: *This work aims to study the three-phase SEPIC rectifiers with high power factor using digital control techniques. As the main issues to be addressed, it is considered the issues related to the performance of power converters, reducing weight and volume, total harmonic distortion for input currents and power factor improvement. These features are highly affected by the choice of the power converter, the control systems and modulation techniques. These tasks are the focus of study in this project. In this respect, the SEPIC converters appear as attractive solutions for presenting single-stage structures, and the ability to act as a step-down structures and elevating the output voltage. With this, the activities related to the project of the rectifier, the assembling and testing of the power stage and the programming tasks of control systems and digital modulation were developed. In the final stage of the project, the different parts of the system will be integrated and the implementation of a prototype will be realized for experimental verification of these concepts.*

Keywords: *Power Quality. AC-DC Converters. Single-Ended Primary-Inductor Converter.*

¹ Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), *campus* Florianópolis, IFSC <flabio@ifsc.edu.br>.

² Acadêmico do Curso de Engenharia Eletrônica, *campus* Florianópolis, IFSC <alessandrololo@hotmail.com>.

³ Acadêmica do CST em Sistemas Eletrônicos em Eletrônica, *campus* Florianópolis, IFSC <jessica_ramos_ribeiro@hotmail.com>.

⁴ Acadêmico do Curso de Engenharia Eletrônica, *campus* Florianópolis, IFSC <joao.maker@gmail.com>.

⁵ Acadêmico do CST em Sistemas Eletrônicos em Eletrônica, *campus* Florianópolis, IFSC <marcosv86@hotmail.com>.

⁶ Acadêmico do CST em Sistemas Eletrônicos em Eletrônica, *campus* Florianópolis, IFSC <viniciusseidler@gmail.com>.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de circuitos retificadores trifásicos com elevado fator de potência tem merecido grande atenção por parte de engenheiros e pesquisadores da área de eletrônica de potência (BATISTA, 2010; FRIEDLI, 2011; KOLAR, 1997; STUPAR, 2012), visando melhoria de desempenho

em características como: fator de potência, rendimento, densidade de potência, regulação da tensão de saída, esforços de tensão e corrente nos semicondutores, *etc.*

No que se refere ao fator de potência (FP), os retificadores convencionais apresentam distorções nas correntes drenadas da rede e um reduzido fator de potência.

Como consequências destas características, surgem distorções nas tensões de alimentação, aumentam as perdas nas redes de distribuição e interferências eletromagnéticas, prejudicando o funcionamento de outros equipamentos.

Desta forma, estes retificadores não conseguem atingir o desempenho satisfatório para atender normas internacionais que definem os limites recomendados para o conteúdo harmônico dos sinais de corrente em equipamentos eletrônicos.

Por outro lado, nos retificadores com elevado fator de potência (PFC) que utilizam a modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*), o comando adequado dos interruptores nos retificadores PWM permite a obtenção de correntes de entrada praticamente senoidais e em fase com as tensões de alimentação e reduzidas taxas de distorção harmônica.

É grande o número de topologias de conversores trifásicos PWM unidirecionais apresentados na literatura, quando comparadas com os retificadores do tipo *Boost*, as topologias SEPIC (*Single-Ended Primary-Inductor Converter*) apresentam as vantagens de operar como abaixadoras/elevadoras de tensão e de possuir circuitos de partida mais simples.

Em sistemas que utilizam aerogeradores, estes retificadores contribuem para o aumento do rendimento do alternador e utiliza-se um menor número de conversores para a adequação da energia a ser armazenada nos bancos de baterias.

Em artigo apresentado no INDUSCON 2012 (BATISTA, 2012) propõe-se um estudo teórico sobre retificadores SEPIC. Neste projeto dá-se continuidade a este estudo, visando a análise de outras estruturas de retificadores SEPIC trifásicos com elevado fator de potência e implementação de um protótipo de retificador PWM.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Com o crescimento dos equipamentos eletrônicos, houve um grande crescimento das chamadas cargas não lineares. Estas cargas geralmente necessitam da energia elétrica na forma de tensão e corrente contínua, necessitando de uma conversão de corrente alternada disponibilizada pela rede para corrente contínua, dando origem aos retificadores.

Os retificadores podem ser projetados para trabalhar em diferentes níveis de potência, desde uma fração de watt, até milhões de watts (em linhas de transmissão em CC, por exemplo). A fim de equilibrar a potência drenada de cada fase, quando se trabalha com potências elevadas, isso é, acima de 2 kW, são utilizados os retificadores trifásicos. Além disso, os retificadores podem ser classificados

em dois grupos: passivos (não controlados) e os ativos (controlados).

Os retificadores convencionais utilizam conversores passivos, que por utilizarem geralmente uma topologia de retificação de onda completa por diodos (que drenam uma corrente pulsada), distorcem a corrente e a tensão, ocasionando um alto nível de harmônicas e um reduzido fator de potência, contribuindo para uma série de problemas desde a geração até a distribuição. Por conta destas distorções nas correntes e tensões de entrada os equipamentos não atingem os padrões exigidos por normas internacionais (BORGONOVO, 2005).

2.1. Normas

Algumas das normas internacionais, que foram criadas com o intuito de limitar os níveis de harmônicas injetadas na rede, são: a norma européia EN50006, apresentada em 1975 pela CENELEC (*Comission Européan pour la Normalisacion Elétrique*), que em 1982 foi substituída pela IEC-555 (*International Electrotechnical Commission*), revisada em 1991. Além da norma européia IEC-61000-3-4, que delimita o THD em 16% para equipamentos com uma corrente maior que 16 A (BATISTA, 2006), a norma norte americana IEEE-519 é ainda mais rígida, sendo também uma das principais (BORGONOVO, 2005).

2.2. Fator de potência

Para ser avaliado o comportamento das cargas e o efeito provocado por elas na rede, são utilizados alguns fatores de desempenho. O mais conhecido é o fator de potência, que é definido, como a razão entre a potência média em um período de rede, denominada potência ativa, e o produto entre a tensão eficaz e a corrente eficaz na carga, denominada potência aparente (BORGONOVO, 2005).

2.3. Interpretação do fator de potência

Mesmo com o deslocamento nulo entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, não é possível obter fator de potência maior que a unidade, por outro lado, quando a corrente se apresenta como imagem da tensão, o conceito de fator de potência se refere à parcela de carga que pode se representada por uma resistência pura. Quando a resistência pura é submetida a uma tensão qualquer, a corrente será uma imagem da tensão, a menos de um ganho K (valor da resistência). Ou seja, para qualquer forma de onda de tensão e corrente, onde uma é a imagem da outra, obtêm-se fator de potência unitário. Então, o fator de potência determina a parcela da carga que pode ser representada por um resistor puro, que será

responsável pela totalidade da potência ativa processada.

Para que se tenha fator de potência unitário de uma tensão distorcida, a corrente drenada pela carga deve ser igualmente distorcida, mantendo o mesmo formato da tensão. Mesmo com taxa de distorção harmônica da corrente diferente de zero, tem-se fator de potência unitário.

Pela definição de fator de potência apresentada, uma carga qualquer pode ser dividida em duas parcelas, a primeira representada por um resistor, que absorve uma corrente como imagem de tensão, responsável por toda a potência ativa processada. E uma segunda parcela, complementar, representada por uma fonte de corrente, de forma que a potência média absorvida por ela sempre será nula. O circuito equivalente apresentado na Figura 1 (BORGONOVO, 2005).

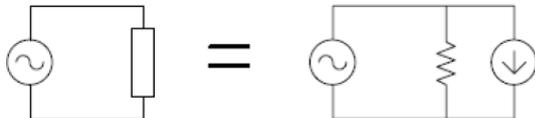


FIGURA 1 - Carga qualquer representada por uma carga equivalente (BORGONOVO, 2005, p. 15).

2.4. Fator de ondulação de potência

Para o fator de ondulação de potência, é possível uma avaliação que abranja sistemas trifásicos, a potência instantânea é dada pela soma das potências em cada fase. Deve-se observar se o FOP (fator de ondulação de potência) de cada uma das fases é diferente do FOP total do sistema. Como o exemplo de um sistema monofásico alimentando uma carga resistiva, apresenta FOP igual a 2. Em um sistema trifásico alimentando uma carga resistiva trifásica balanceada, tem-se FOP igual a 1, ao se somar as curvas de potência de cada uma das fases, obtêm-se uma curva de potência instantânea constante. As curvas de potência em cada uma das fases apresentam um nível médio, correspondente à potência ativa, acrescida de uma componente senoidal com frequência igual ao dobro da frequência da rede.

Já para sistemas trifásicos, alimentando cargas balanceadas, drenando correntes senoidais da rede em fase com as tensões, observa-se que a curva de potência instantânea é idêntica a de um sistema em corrente contínua, ou seja, sem ondulação. Por isso o FOP é importante para avaliar um sistema trifásico, explicitando o balanço de potência entre as fases.

A taxa de distorção harmônica pode referir-se apenas a uma corrente ou tensão, portanto somente a uma das fases. Ao se avaliar uma carga trifásica, citando determinada taxa de distorção harmônica

para as correntes, supõe-se que todas apresentam a mesma direção.

Pelo fato dos retificadores convencionais passivos apresentarem distorções nas correntes drenadas e baixo fator de potência, resultando em distorções nas tensões de alimentação e aumentando as perdas nas redes de distribuição, além de gerar interferências eletromagnéticas, muitos equipamentos eletrônicos não atingem as exigências mínimas das rígidas normas internacionais, que definem os limites recomendados para o conteúdo harmônico de sinais de corrente (BORGONOVO, 2005).

Utilizando retificadores trifásicos ativos de alto fator de potência baseados em modulação por largura de pulso PWM, pode obter taxas de distorções harmônicas muito baixas, correntes de entrada muito próximas das idealizadas senoidais e em fase com as tensões de alimentação. Em aplicações de elevada potência como UPS (*Uninterrupted Power Systems*) e fontes de alimentação para telecomunicações, nas quais não é necessário o fluxo bidirecional de potência, utiliza-se os retificadores unidirecionais, que apresentam algumas vantagens como a diminuição do número de interruptores, proteção natural contra curto circuito no barramento CC e reduzido processamento de energia pelos interruptores ativos (BORGONOVO, 2005).

Para ilustrar o problema, um retificador trifásico de onda completa com filtro capacitivo (Figura 2) apresenta a tensão e a corrente de entrada (Figura 3) sem correção de fator de potência, na qual a taxa de distorção harmônica da tensão foi de 7,61%, a de corrente foi 80,69% e o fator de potência foi 0,743 (BATISTA, 2009).

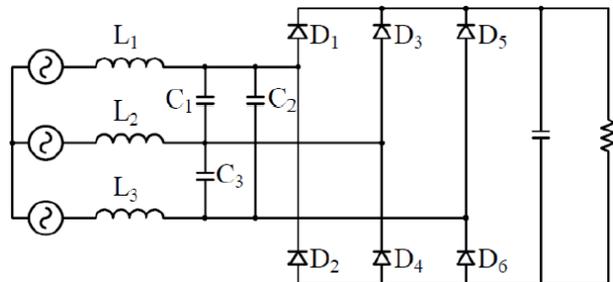


FIGURA 2 - Circuito de um retificador passivo convencional. (BORGONOVO, 2005, p. 33).

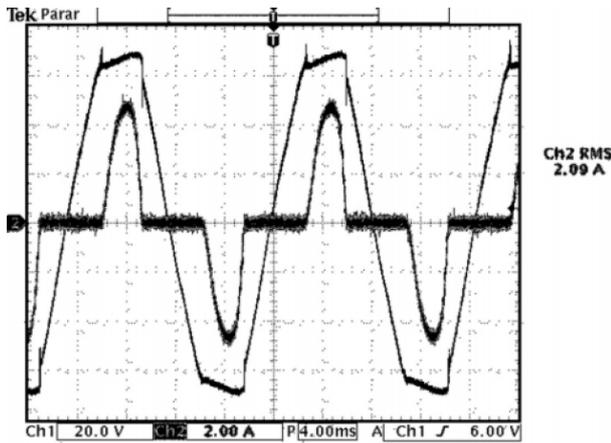


FIGURA 3 - Tensão e corrente de entrada (BATISTA, 2009, p. 5).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo de retificadores SEPIC trifásicos com elevado fator de potência e a implementação do protótipo do conversor de potência, considerou-se as seguintes etapas:

- revisão bibliográfica sobre conversores SEPIC e retificadores PWM;
- definição de parâmetros e especificações de desempenho para o sistema;
- projeto e simulação do estágio de potência do conversor;
- definição de esquemático, elaboração de *layout* e montagem das (PCIs);
- análise de dispositivos de controle digital e estudo de técnicas de controle digital;
- elaboração de programas de controle do conversor;
- ensaios do conversor;
- documentação e redação do resumo e artigo final.

Inicialmente, propõe-se o estudo sobre conversores SEPIC e retificadores PWM. Neste estudo foram analisadas e propostas estruturas de retificadores SEPIC trifásicos com correção de fator de potência operando no modo de condução contínua.

Depois, foi realizada a escolha de parâmetros e especificações de desempenho para o sistema.

Definidos estes itens, partiu-se para o projeto e simulação do estágio de potência do conversor.

Na sequência, foi realizada a definição de esquemático, a elaboração de *layout* das placas de circuito impresso (PCIs). Em paralelo está sendo realizada a análise de dispositivos de controle

digital e o estudo de técnicas de controle digital e modulação.

Em uma próxima etapa, serão montadas as placas de circuito impresso e elaborados programas de controle do conversor, sendo testadas as técnicas de controle e modulação integradas com o estágio de potência do conversor.

Em uma etapa final, serão realizados ensaios com todo sistema e analisados os parâmetros de desempenho do sistema, bem como a documentação e redação de artigos.

Com estas avaliações poderão ser feitas correções principalmente no que se refere aos critérios de controle da tensão de saída, fator de potência e rendimento da estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura sistema para implementação do protótipo do retificador SEPIC com correção de fator de potência é representada pelo diagrama em blocos da Figura 4.

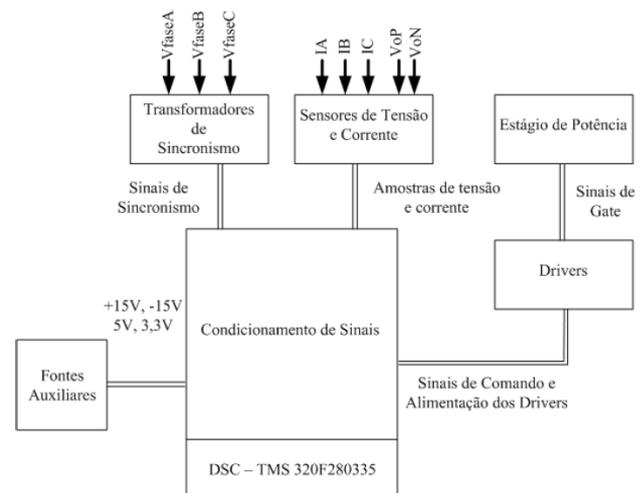


FIGURA 4 - Diagrama em blocos do retificador PWM.

Neste diagrama identifica-se as principais partes componentes do sistema como: o estágio de potência, os circuitos de sensoriamento de tensão e corrente, as fontes auxiliares, os circuitos de sincronismo, os circuitos de comando dos interruptores de potência (*drivers*) e o controlador de sinais digitais (DSC).

Nesta figura, também observa-se a presença do circuito de condicionamento de sinais, responsável pelo tratamento e distribuição dos sinais das diferentes partes do sistema.

A Figura 5 mostra o estágio de potência do retificador a ser implementado.

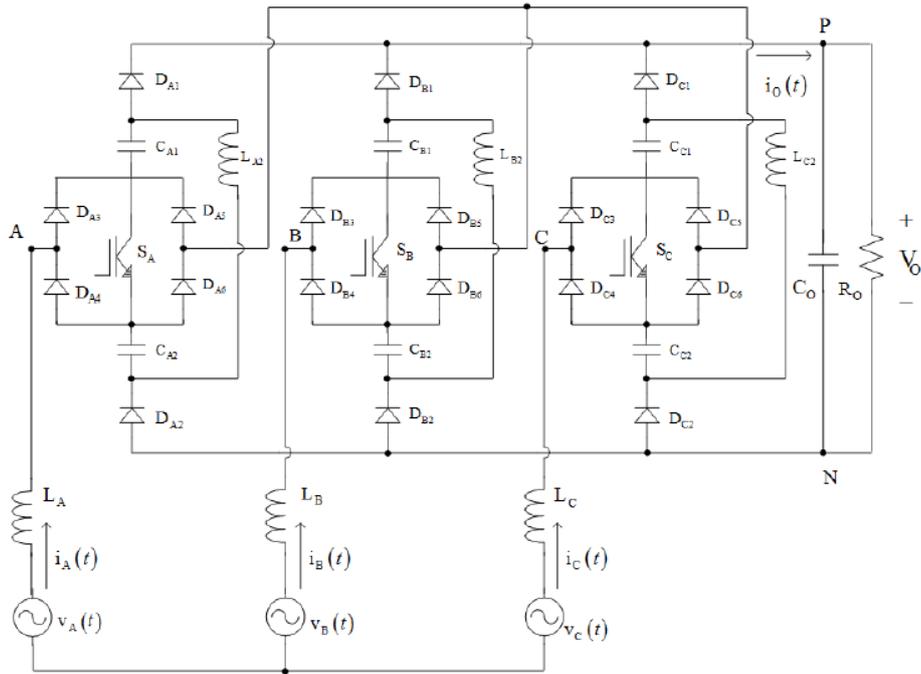


FIGURA 5 - Estágio de potência do retificador trifásico SEPIC PWM.

Como principais características dos retificadores SEPIC pode-se citar (TIBOLA, 2011; BATISTA, 2012):

- operação com correção do fator de potência;
- tensão de saída regulada;
- operação em estágio único;
- operação como elevador e abaixador de tensão;
- utilização de apenas três interruptores ativos de potência;
- redução dos filtros de interferência eletromagnética (EMI) na entrada devido à característica *Boost* de entrada;
- não há necessidade de circuitos de proteção para sobrecorrentes na partida.

4.1. Resultados de simulação

Nas Figuras 6(a), 6(b) e 6(c), são apresentados os principais resultados da simulação do estágio de potência do retificador PWM utilizando os parâmetros propostos para o projeto.

Verifica-se pelas formas de onda das correntes de entrada que estas possuem formato praticamente senoidal, com reduzida taxa de distorção harmônica e o sistema apresenta elevado fator de potência.

Observa-se na Figura 6(c), que durante o transitório de partida, o sistema não está sujeito à elevados picos de corrente ou tensão.

4.2. O Controlador de Sinais Digitais

O retificador trifásico será monitorado por um dispositivo Controlador de Sinais Digitais (DSC). Neste projeto foi utilizado o *kit* de desenvolvimento TMDSPREX28335, apresentado na Figura 7.

Este *kit* utiliza o processador TMS320F28335 da Texas Instruments e permite que sejam testadas várias características dos periféricos deste processador.

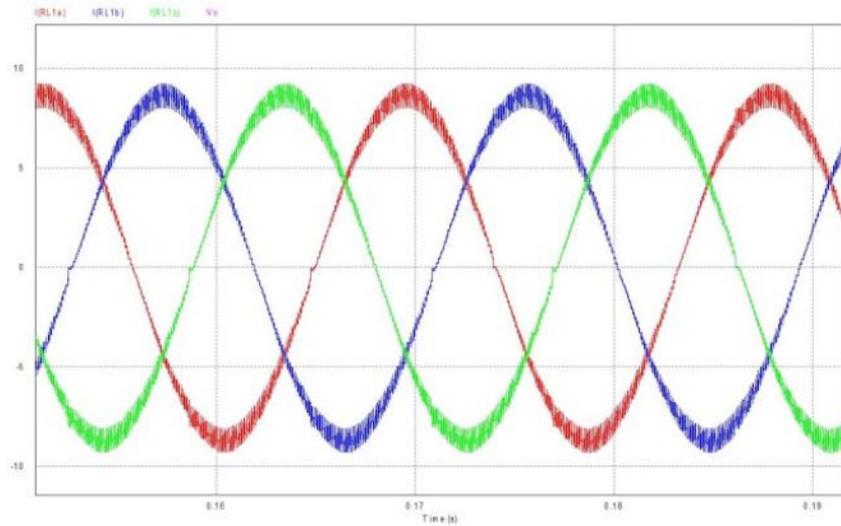
Neste sistema é possível desenvolver e testar partes da programação no *kit* de desenvolvimento e depois utilizar o cartão de controle (*control card*) no protótipo construído, através da utilização de um conector DIMM100.

A arquitetura interna deste processador conta com uma unidade de ponto flutuante, permitindo que sejam realizadas tarefas de controle em tempo real, sendo este processador amplamente utilizado em aplicações de eletrônica de potência.

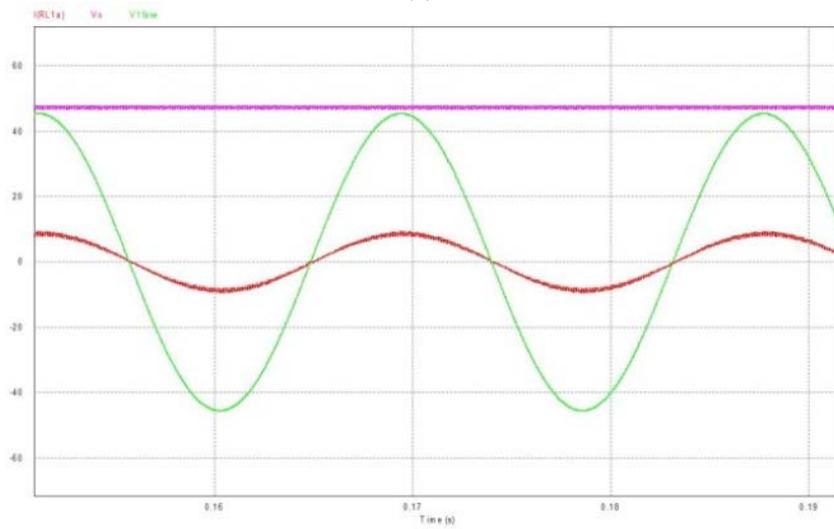
4.3. Condicionamento de Sinais

Inicialmente, desenvolveu-se uma placa de testes para analisar o funcionamento dos circuitos de condicionamento dos sinais do conversor a ser estudado. A Figura 8 mostra uma foto da placa de testes montada.

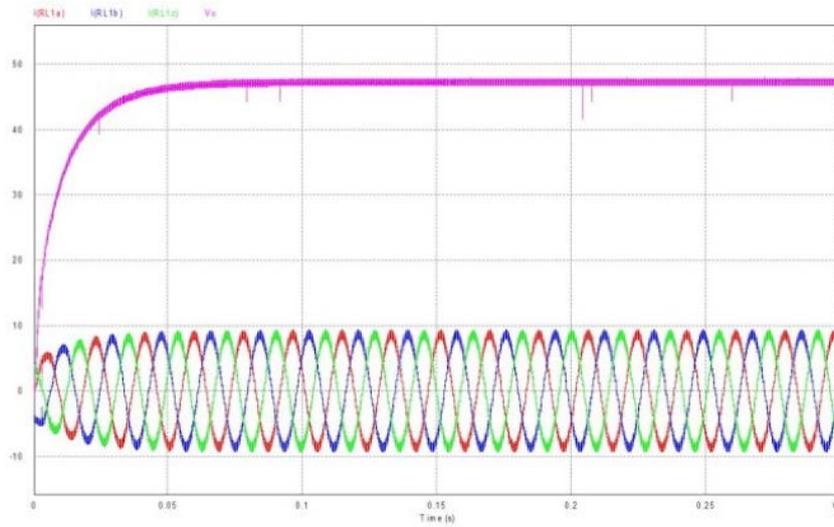
Nesta placa estão incluídos os circuitos de sincronismo, amostragens de tensão e corrente e as fontes auxiliares, bem como os circuitos de adequação destes sinais para o controlador de sinais digitais.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 6 – Gráficos das (a) Correntes de entrada do retificador PWM, (b) tensão e corrente em uma das fases do retificador PWM e (c) Transitório de partida: Correntes de entrada e tensão de saída.

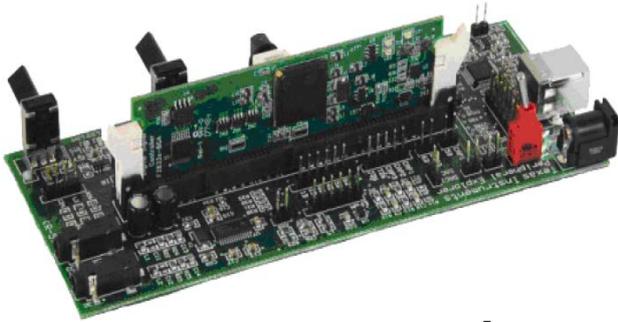


FIGURA 7 - Kit de desenvolvimento⁷ com TMS320F28335.



FIGURA 8 - Placa de testes.

Na Figura 9, é apresentado o sistema de testes utilizando o alternador de um gerador eólico para a geração dos sinais de alimentação.

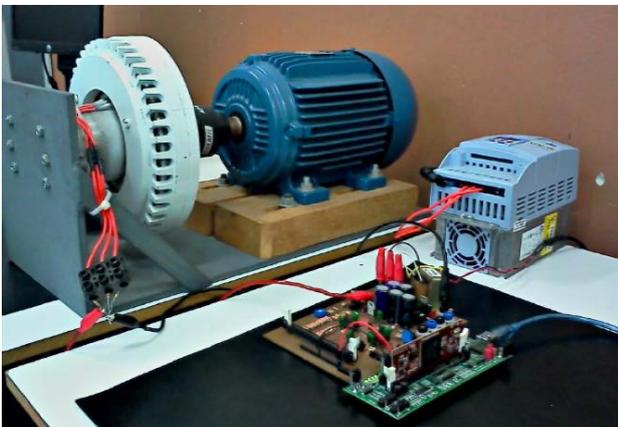


FIGURA 9 - Sistema de testes com alternador.

A Figura 12 e a Figura 13 apresentam os resultados de um ensaio para a medição de grandezas senoidais e dos sinais de sincronismo

Após os testes nesta placa, foram definidas algumas modificações nos circuitos e elaborado um novo *layout* para a confecção de uma nova placa.

Esta placa está em fase de montagem e prevê a realização de todas as amostragens necessárias para o projeto (sincronismo, correntes e tensões), bem como os circuitos de adequação dos sinais para o controlador de sinais digitais, o conector para o DSC

⁷ Disponível em <http://www.ti.com/tool/tmdspex28335>.

e circuitos de pré-tratamento dos sinais de comando para os *drivers*.

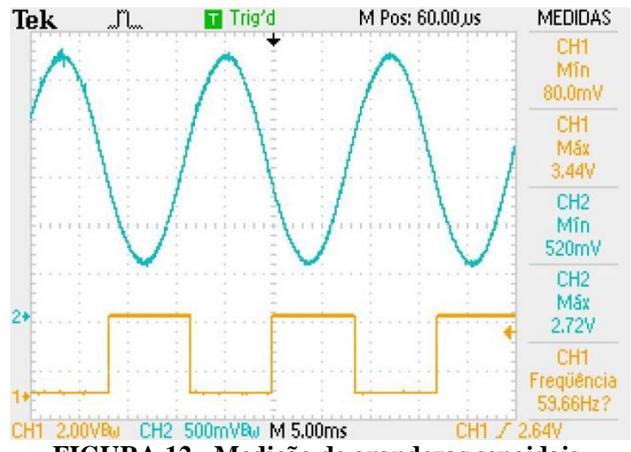


FIGURA 12 - Medição de grandezas senoidais e sinais de sincronismo (osciloscópio).

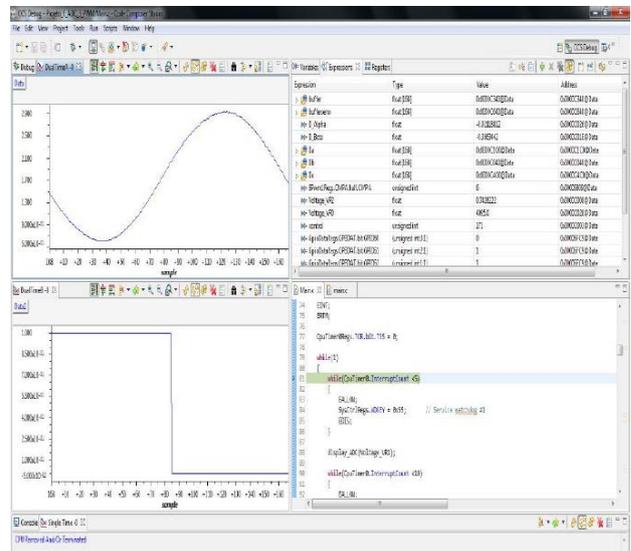


FIGURA 13 - Medição de grandezas senoidais e sinais de sincronismo (aquisição com o DSC).

5. CONCLUSÕES

Até o presente momento, foram realizadas as tarefas de revisão bibliográfica, definição de parâmetros e especificações de desempenho para o sistema, projeto e simulação do estágio de potência do conversor, definição de esquemático, elaboração de *layout* da placa de condicionamento de sinais e da placa com sensores de corrente.

Também foram analisados os dispositivos de controle digital e testados os programas de amostragens dos sinais de sincronismo, tensões e correntes do conversor.

Restam ainda para serem desenvolvidas as atividades de estudo de técnicas de controle digital, a elaboração de programas de controle do conversor e os ensaios do conversor.

Como principais fatores que influenciaram no atraso do desenvolvimento do projeto, considera-se

as dificuldades na confecção e testes de placas de circuito impresso, com a interrupção da operação da fresadora disponível no laboratório de protótipos e a falta de recursos para a aquisição de componentes e para a confecção de PCIs fora da instituição.

Os circuitos e programas testados até o momento apresentaram resultados satisfatórios e espera-se que o sistema completo venha a apresentar as características desejadas e evidenciadas no estudo teórico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (Edital Universal de Pesquisa nº 12/2012/PRPPGI) e à FAPESC (Chamada Pública 04/2012 - T.O. 11.340/2012-9) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, F.A.B.; BARBI, I. **Modulação vetorial aplicada a retificadores trifásicos PWM unidirecionais**, 282p, 2006.
- BATISTA, F.A.B.; BARBI, I. *Didatic System for digital control with power electronics application*. Florianópolis, 2009.
- BATISTA, F.A.B.; BARBI, I. *Space vector modulation for two-level unidirectional PWM rectifiers*. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 25, pp. 178-187, 2010.
- BATISTA, F.A.B.; ILLA FONT, C.H. *Proposal of Three-phase Two-level Unidirectional SEPIC PWM Rectifiers with High Power Factor*, In: **X Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, Fortaleza. INDUSCON 2012, v. X. pp. 01-06, 2012.
- BORGONOVO, D. **Análise modelagem e controle de retificadores de PWM trifásicos**. Florianópolis, 255p., 2005.
- FRIEDLI, T.; KOLAR, J.W. *The essence of three-phase PFC rectifier systems*, In: **IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)**, pp. 1-27, 2011.
- KOLAR, J.W.; SREE, H.; DROFENIK, U.; MOHAN, N.; ZACH, F.C. *A novel three-phase three-switch three-level high power factor SEPIC-type AC-to-DC converter*, In: **Twelfth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC '97**, v. 2, pp. 657-665, 1997.
- STUPAR, A.; FRIEDLI T.; MINIBOCK J.; KOLAR, J.W. *Towards a 99% efficient three-phase buck-type PFC rectifier for 400-V DC distribution systems*, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 4, pp. 1732–1744, 2012.
- TIBOLA, G.; BARBI, I. *Analysis and design of a three-phase high power factor rectifier based on the SEPIC converter operating in discontinuous conduction mode*, In **Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)**, pp. 26–31, 2011..