



## MÓDULO DIDÁTICO PARA ENSINO DE CONVERSÃO DE ENERGIA EM CORRENTE ALTERNADA

Everson Osvanir da Silva<sup>1</sup>, Lucas Groposo Silveira<sup>2</sup>, Clóvis Antônio Petry<sup>3</sup>

**Resumo:** Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento e descrição de um módulo didático para ensino e estudo de conversores de corrente alternada. Este módulo apresenta características únicas de baixo custo, robustez e versatilidade, flexibilidade de aplicações e programação, interface com o usuário, controle, comando e supervisão todas realizadas por microcontrolador. Pelas suas pequenas dimensões e pelo emprego de componentes convencionais e de fácil aquisição, este módulo pode ser facilmente implementado pelos próprios alunos e alterado para aplicações diferentes das originalmente propostas. Busca-se assim integrar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Eletrônica Analógica, Eletrônica Digital, Programação de Microcontroladores e Eletrônica de Potência visando ao desenvolvimento de soluções para problemas convencionais do mercado tecnológico, motivando os estudantes na aplicação de tecnologias do estado da arte com soluções bem estabelecidas no meio industrial.

**Palavras-chave:** Módulo didático. Ensino tecnológico. Conversão CA-CA. Eletrônica de Potência.

**Abstract:** *This paper introduces the description and development of an alternating current converter teaching module, which presents unique features for low cost microcontrolled forms of command, control and supervision of applications and programming of a versatile and robust user interface. Due to its small size and the use of regular components, the module can be easily built by the students and altered for different applications than the one suggested. The objective is to integrate the knowledge acquired in the disciplines of analog electronics, digital electronics, microcontrollers programming, and power electronics, for the solutioning of common issues in the technologic market, motivating the students to apply the technologies used in the industrial environment and also the latest technologies.*

**Keywords:** *Didactic module. Technological education. AC-AC conversion. Power Electronics.*

<sup>1</sup> Acadêmico do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos do DAELN do IF-SC <everson.osvanirdasilva@gmail.com>.

<sup>2</sup> Acadêmico do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos do DAELN do IF-SC <lucas.groposo@gmail.com>.

<sup>3</sup> Professor do DAELN, campus Florianópolis do IF-SC <petry@ifsc.edu.br>.

### 1. INTRODUÇÃO

O ensino nas áreas de conversão de energia e eletrônica de potência é obrigatório nos cursos superiores de tecnologia e de engenharia nas áreas de eletricidade e eletrônica. Assim, diversas ferramentas didáticas têm sido divulgadas na literatura visando facilitar o desenvolvimento dos objetivos das disciplinas relacionadas ao acionamento de cargas e eletrônica de potência (GARCIA; FERREIRA; POMILIO, 2008; OLIVEIRA, VENKATARAMANAN, 2008; VENDRUSCULO; FERREIRA; POMILIO, 2008; SILVA *et al.*, 2006).

A disciplina Conversores Estáticos da sexta fase do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos do IF-SC é uma unidade que reúne conceitos de diversas outras unidades do curso de Sistemas Eletrônicos. Nesta disciplina, são apresentados os conversores estáticos de potência aplicados nas diversas áreas da sociedade atual.

Além disso, o foco do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos é a aplicação intensa de microcontroladores e microprocessadores na eletrônica em todas as suas concepções. Desta forma, a conversão eletrônica de energia, integrando-se ao objetivo maior do curso, pode ser usada na alimentação dos circuitos de eletrônica

digital ou fazer uso de seu poder de processamento digital para aplicações diversas no processamento eletrônico de energia.

Atualmente, nas disciplinas correlatas aos conversores estáticos, além do desenvolvimento de projetos teóricos, são realizadas simulações digitais para verificar o funcionamento dos circuitos estudados e ensaios em laboratório também fazem parte do desenvolvimento da disciplina. É utilizado um *kit* para experimentos em conversão de corrente alternada, mas que não permite o acesso ao seu conteúdo e inflexível do ponto de vista de alterações no *software* e nas possibilidades de aplicações.

Os *kits* didáticos disponíveis no mercado para esta área contemplam poucas aplicações, são de custo elevado e de difícil acesso, sendo estruturas fechadas que não permitem a sua reconfiguração e o acesso a variáveis internas do processo. Com isso, tornam-se sistemas limitados e pouco atrativos (CARMO *et al.*, 2006; NETO, 2007).

A possibilidade de os estudantes interagirem com o circuito eletrônico que estão utilizando nos experimentos, além disso, com a possibilidade de construir seus próprios módulos didáticos de estudo, levará a um domínio maior da tecnologia envolvida e a consolidação dos conhecimentos de *software* e *hardware*, o que será imprescindível em suas carreiras na área tecnológica (GARCIA, 2007).

Desta forma, e visando integrar o conhecimento de outras disciplinas do Curso, foi desenvolvido um módulo didático para ensino e estudo de conversores de corrente alternada, microcontrolado, de baixo custo, fácil construção e manutenção e totalmente transparente ao aluno.

## 2. CONVERSÃO DE ENERGIA EM CORRENTE ALTERNADA

A energia elétrica é processada pelos circuitos eletrônicos para fazê-la aceitável para diversas aplicações. Uma das tarefas do processamento eletrônico da energia é controlar o fluxo de energia e, para tal, usam-se circuitos elétricos denominados de conversores estáticos de potência (PETRY, 2005).

Um dos objetivos da eletrônica de potência, usando-se de seus conversores estáticos, é o controle do fluxo de energia de uma fonte elétrica para uma carga elétrica com alta eficiência, alta disponibilidade, alta confiabilidade, pequeno tamanho, reduzido peso e baixo custo.

### 2.1. Conversão em corrente alternada

A classificação mais geral dos conversores estáticos de potência é aquela segundo a qual os conversores são classificados de acordo com sua função em quatro grupos:

- 1) Conversores CC-CC;
- 2) Conversores CA-CC;
- 3) Conversores CC-CA;
- 4) Conversores CA-CA.

No contexto deste trabalho, conversão CA-CA (corrente alternada – corrente alternada) será definida como aquela que converte energia da forma alternada (tensão e corrente), preferencialmente da rede de energia elétrica, em energia alternada (tensão e corrente) com valores de amplitude ajustável e frequência bem definida (PETRY, 2005).

A conversão eletrônica de energia envolve a comutação em baixa ou alta frequência de dispositivos semicondutores ou qualquer outro elemento que possa realizar a função de comutação. A expansão de conversores de potência para conversão de tensão alternada em tensão alternada, operando com semicondutores em alta frequência tardou a ocorrer, em comparação com conversores de tensão contínua, justamente em virtude dos fenômenos de comutação.

### 2.2. Conversores CA-CA

Um conversor CA-CA é aquele que opera com entrada em tensão alternada e saída também em tensão alternada. Na Figura 1 mostra-se o princípio dos conversores que utilizam compensação série de tensão. Neste caso, a tensão de saída é controlada adicionando-se ou subtraindo-se uma determinada tensão, que estará em série com a tensão de entrada (PETRY, 2001).

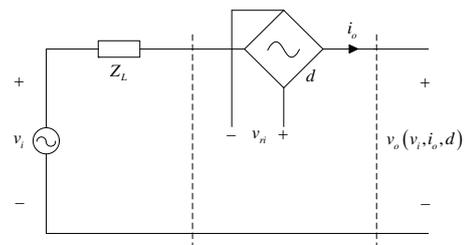


FIGURA 1 – Princípio da compensação série de tensão.

Na Figura 2, por sua vez, é mostrado o princípio da compensação não-série, ou seja, convencional, onde o conversor fica conectado entre a entrada de energia e a saída do circuito.

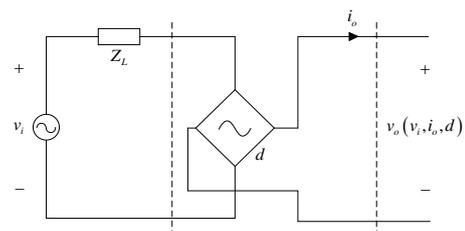
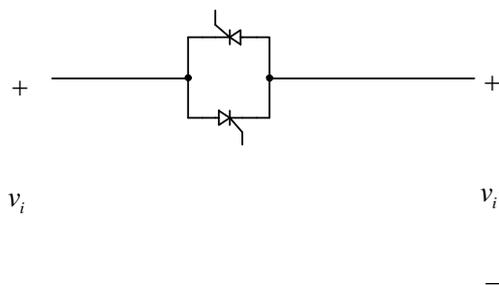


FIGURA 2 – Princípio da compensação não-série de tensão.

Os circuitos mais comuns e mais utilizados, devido a seu baixo custo, alta robustez e facilidade de projeto e montagem, são os conversores utilizando tiristores. Na Figura 3 é mostrado um circuito simples que pode ser utilizado para diversas aplicações em CA-CA, operando em baixa frequência e muito usado em controle de cargas, acionamentos, etc. (ERICKSON, 1997; LANDER, 1988; MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1995).



**FIGURA 3 – Conversor CA-CA utilizando tiristores.**

### 2.3. Aplicações dos conversores CA-CA

Os conversores CA-CA, utilizando ou não a estrutura apresentada na Figura 2, são amplamente usados em diversas aplicações residenciais, comerciais ou industriais (BARBI, 2005). Algumas podem ser destacadas:

- controle de luminosidade – é uma das aplicações mais comuns e emprega a estrutura da Figura 3, onde se controla a tensão na carga pelo acionamento adequado dos tiristores. É empregado no controle de lâmpadas incandescentes;
- controle de temperatura – da mesma forma que no controle de luminosidade, neste caso se controla a temperatura alterando a tensão eficaz em cargas resistivas, por exemplo, em chuveiros, ferros de soldar, fogões, estufas, etc.;
- acionamento de motores de corrente alternada – pequenos motores podem ser acionados usando o circuito da Figura 3, controlando-se sua velocidade ou sua partida de maneira suave. Para o controle na partida, inclusive motores de maior porte, podem ter sua corrente de partida controlada com o circuito da Figura 3;
- estabilizadores de tensão – regular o valor da tensão de saída, para alimentação de cargas como computadores e seus periféricos é uma aplicação usual de conversores CA-CA, podendo para tal utilizar também o circuito da Figura 3;
- controle de cargas – uma utilização muito frequente de conversores CA-CA é como uma chave eletrônica para ligar e desligar

cargas em intervalos pré-determinados ou conforme condições do ambiente, por exemplo, ligando a iluminação no período noturno, acionamento de bombas de água quando de sua falta, etc.;

- automação predial – o controle de cargas, através de circuitos inteligentes visando à economia de energia ou otimização de seu funcionamento é uma das aplicações mais promissoras dos conversores CA-CA, permitindo o controle a distância, a operação em regime automático, dentre outras facilidades com o emprego da eletrônica analógica e digital.

### 3. MÓDULO DIDÁTICO DE CONVERSÃO DE ENERGIA EM CORRENTE ALTERNADA

Um módulo didático para ensino e estudo de conversores de corrente alternada é um circuito eletrônico, compreendendo estágios de alimentação, potência, controle, acionamento de cargas, sinalização, proteção e interfaces com o usuário.

Conceitualmente, um módulo didático deve ser simples, de fácil operação, ser robusto e imune a falhas corriqueiras, flexível para alterações e configurações e de baixo custo para montagem e manutenção.

Considerando todas estas condições, concebeu-se um circuito eletrônico com alimentação diretamente da rede de energia, inicialmente em 220 V, para acionamento de cargas de baixa potência utilizando tiristores e com flexibilidade suficiente, graças ao emprego de microcontrolador, para implementação de diversas técnicas de acionamento destas cargas em corrente alternada.

Assim, com um estágio de potência extremamente simples, isolamento através de optoacopladores, fonte de alimentação linear de baixa potência, controle, comando e interface com o usuário empregando um microcontrolador de baixo custo e grande versatilidade em termos de entradas/saídas e processamento, pode-se com um mesmo *hardware*, alterando apenas a configuração do *software*, elaborar e executar o controle utilizando técnicas como: controle por ângulo de fase, controle por ciclos inteiros, acionamento sequencial e inteligente, partida suave de cargas, dentre inúmeras outras aplicações.

Para facilitar a elaboração das técnicas de controle, foi desenvolvido também um conjunto de funções, elaboradas em linguagem C, para a configuração dos dispositivos externos (*display*, botões e LEDs) e a configuração dos registradores do microcontrolador, possibilitando ao programador focar-se apenas na aplicação. A Figura 4 mostra de maneira resumida a proposta deste projeto.

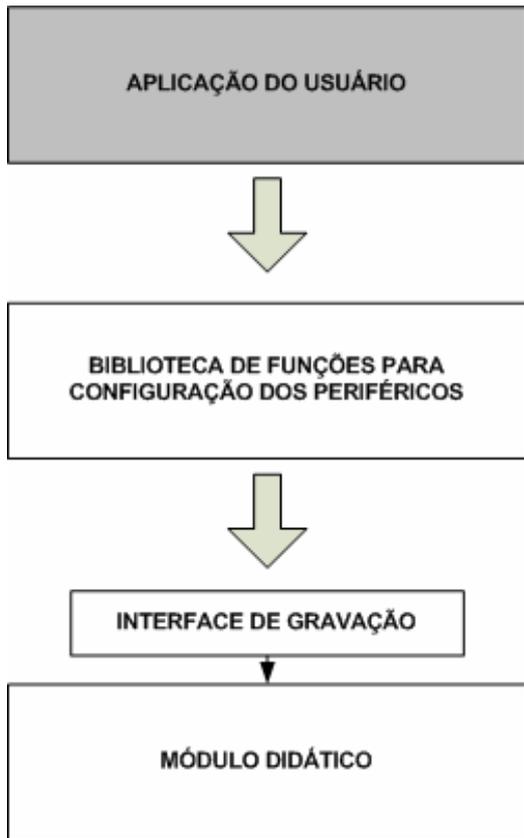


FIGURA 4 – Modelo básico do sistema.

### 3.1. Descrição do hardware

O módulo didático é composto por três blocos principais: fonte auxiliar, circuito de controle e circuito de potência. Cada bloco é descrito com detalhes no diagrama da Figura 5.

A primeira etapa a ser descrita na Figura 5 é a fonte auxiliar. Esta fonte tem a função, além de alimentar o circuito de controle, fornecer o sinal apropriado para ser lido pelo microcontrolador para detecção de zero do ciclo do sinal senoidal da rede elétrica. A fonte é composta, basicamente, de um transformador de tensão linear de 220 V para 9+9 V com ponto central, um retificador de onda completa de meia-ponte, um filtro capacitivo e, por fim, um regulador de tensão para 5 V em tensão contínua. Como pode ser visto no bloco da fonte na figura, esta possui um diodo, depois do retificador, que funciona como um isolador do sinal retificado que elimina a ação do filtro capacitivo nesta etapa, pois é este sinal que servirá para detectar o ponto zero da rede elétrica no bloco do circuito de controle. É possível verificar também que o sinal retificado, antes de seguir para o próximo bloco, é grampeado por um diodo Zener de 5 V que adapta o sinal para ser lido pelo microcontrolador, evitando sobre-sinal no canal analógico/digital (AD), já que este funciona com tensão máxima de 5 V.

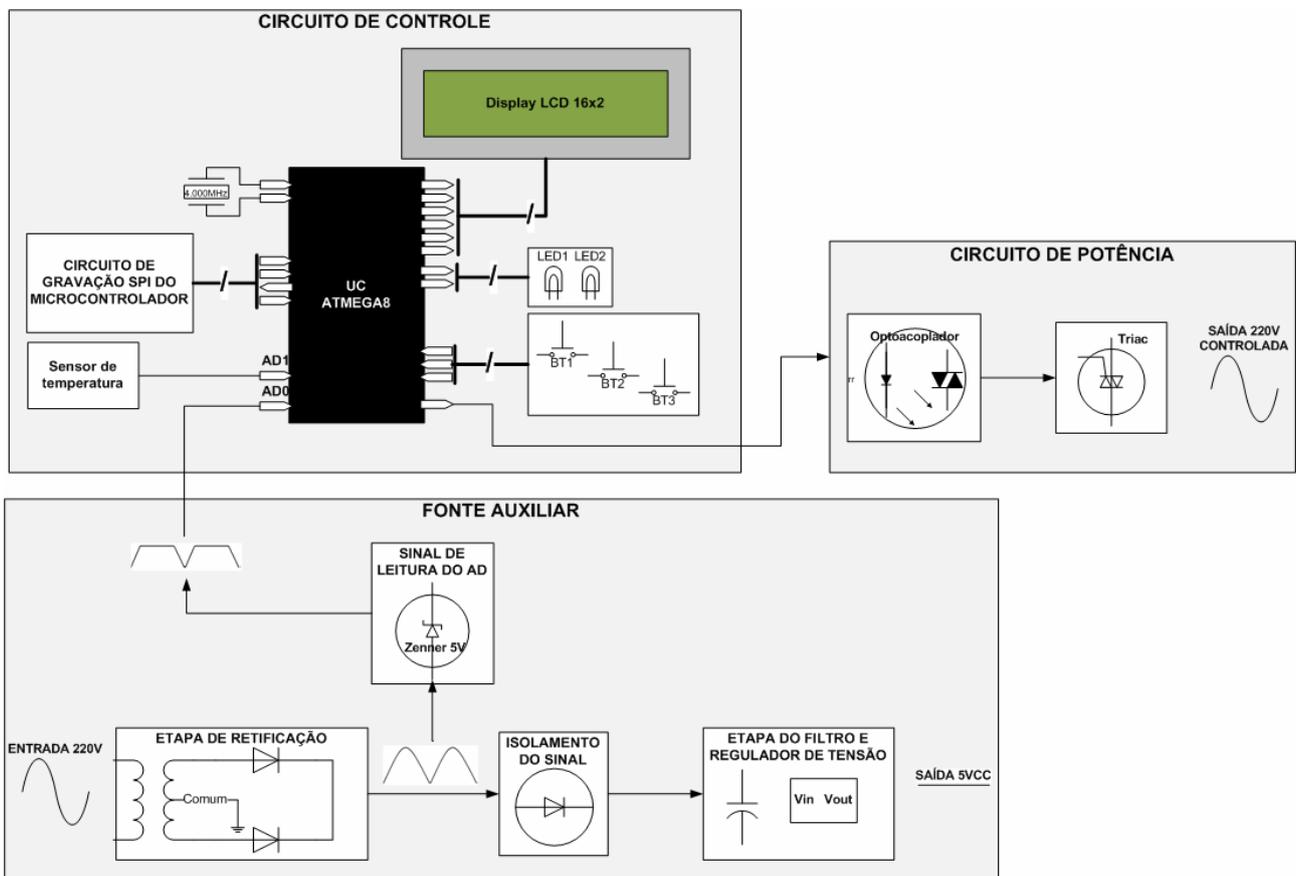


FIGURA 5 – Diagrama esquemático simplificado do módulo didático.

Na próxima etapa é descrito o bloco do circuito de controle. Este bloco tem a função de detectar o ponto zero do sinal da rede elétrica e controlar adequadamente, conforme a aplicação, o circuito de potência que controlará uma carga qualquer. Para isso, o controle é feito pelo microcontrolador ATMEGA8, do fabricante ATMEL, que possui, entre outros periféricos, seis canais multiplexados de conversor AD de resolução de 10 bits que é o responsável pela detecção do zero do sinal da rede elétrica. O circuito de controle possui também três botões, dois LEDs (Diodo Emissor de Luz) de sinalização, um *display* de LCD que serve como interface de manipulação do módulo pelo usuário. Um sensor de temperatura também foi acoplado para desenvolver controle específico desta grandeza. Por último, tem-se um circuito de gravação *Serial Peripheral Interface* (SPI) para que o programador carregue seu programa no microcontrolador.

O último bloco corresponde ao circuito de potência do módulo didático. Este possui, basicamente, um circuito com isolamento óptico, acionado pelo pino de controle do microcontrolador, que comanda um *Triode for Alternating Current* (TRIAC) de potência. O TRIAC, por sua vez, é um componente que possui dois tiristores encapsulados e possui o terminal de controle (*gate*) em comum aos dois. É utilizado para aplicações em corrente alternada e funciona como uma chave controlada por tensão aplicada ao *gate*. Por fim, esse circuito acionará uma carga monofásica qualquer como, por exemplo: motores, resistências, lâmpadas, equipamentos eletroeletrônicos, entre outros.

Na Figura 6 é apresentada a foto do módulo didático desenvolvido.

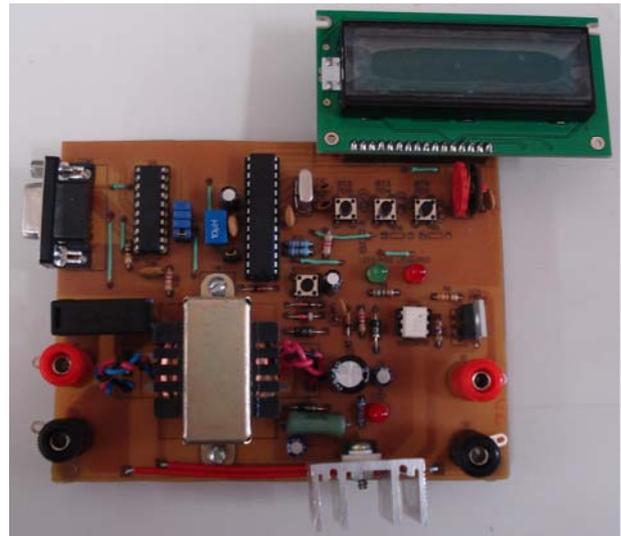


FIGURA 6 – Fotografia do módulo didático.

#### 4. RESULTADOS DE LABORATÓRIO

Para validação do módulo didático serão apresentados dois programas utilizando as técnicas de controle por ângulo de fase e ciclos inteiros para conversores CA-CA, elaborados por *software* no microcontrolador, responsável pelo controle do sistema. Essas duas técnicas podem ser adaptadas para diversas aplicações.

##### 4.1. Operação com controle por ângulo de fase

O controle por ângulo de fase consiste em fornecer energia controlada para uma carga CA a cada semiciclo do sinal da rede elétrica. O fluxograma da Figura 7 mostra o procedimento de controle desta técnica.

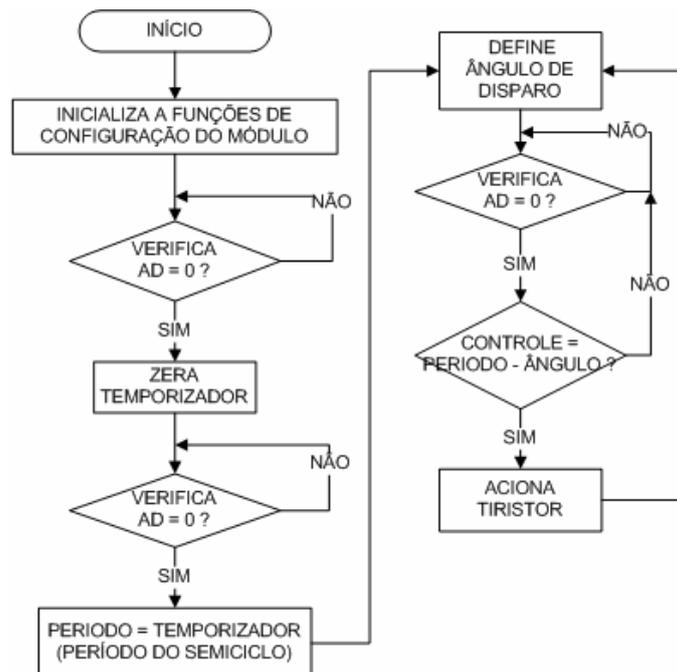
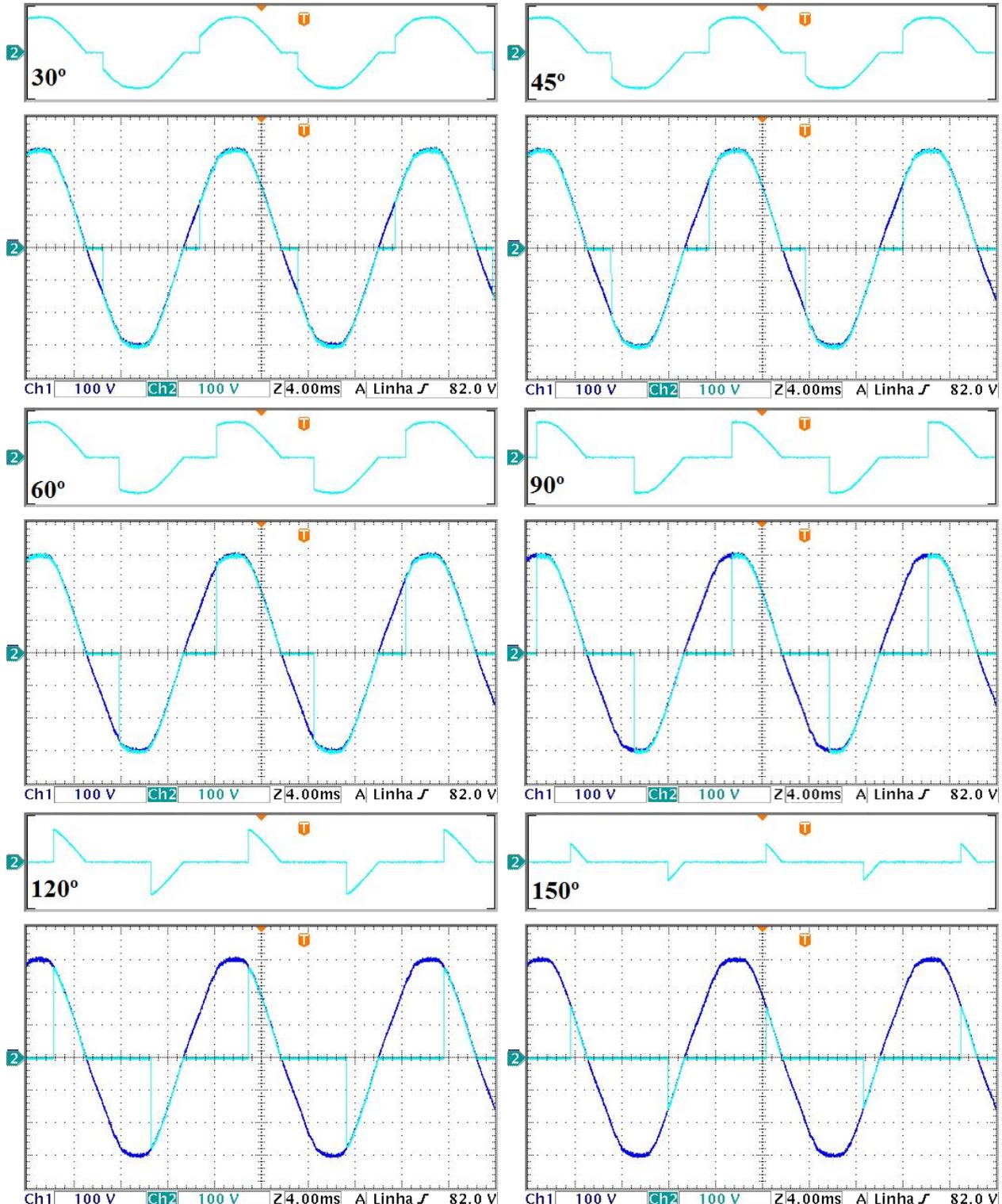


FIGURA 7 – Fluxograma básico para controle por ângulo de fase.

O controle é feito medindo o ponto zero do sinal senoidal da rede elétrica, salvando o período do semiciclo deste sinal e acionando o TRIAC do circuito de potência, em certo ângulo entre 0° (carga totalmente ligada) e 180° (carga totalmente desligada) para cada semiciclo do sinal. Este tipo de controle pode ser usado, por exemplo, para controle de luminosidade de uma lâmpada incandescente. Adicionando uma rotina de incremento automático

do ângulo de fase para o disparo do TRIAC a este programa, é possível usá-lo como chave de partida suave para cargas que necessitam de um controle de corrente inicial.

A Figura 8 mostra o comportamento do sinal de saída para carga em relação ao sinal da rede elétrica para os ângulos de fase de 30°, 45°, 60°, 90°, 120° e 150°. A linha em azul escuro representa o sinal da rede e a linha em azul claro o sinal da carga.



**FIGURA 8 – Aquisições em osciloscópio digital para o comportamento do sinal de saída para carga em relação ao sinal da rede elétrica para alguns ângulos de fase.**

**4.2. Operação com controle por ciclos inteiros**

No controle por ciclos inteiros, o TRIAC é acionado no intervalo de  $x$  ciclos completos do sinal da rede por  $n$  ciclos completos de operação, repetindo o acionamento após cada operação. O fluxograma da Figura 9 exemplifica esse procedimento. Essa técnica pode ser usada para controle de temperatura, como mencionado na seção 2.3.

Para a aplicação elaborada foram definidos 10 ciclos completos de operação, desta forma, as aquisições da Figura 10 mostram o comportamento do sinal da carga pelo sinal da rede elétrica para  $x/10$  ciclos completos. A linha em azul escuro representa o sinal da rede e a linha em azul claro o sinal da carga.

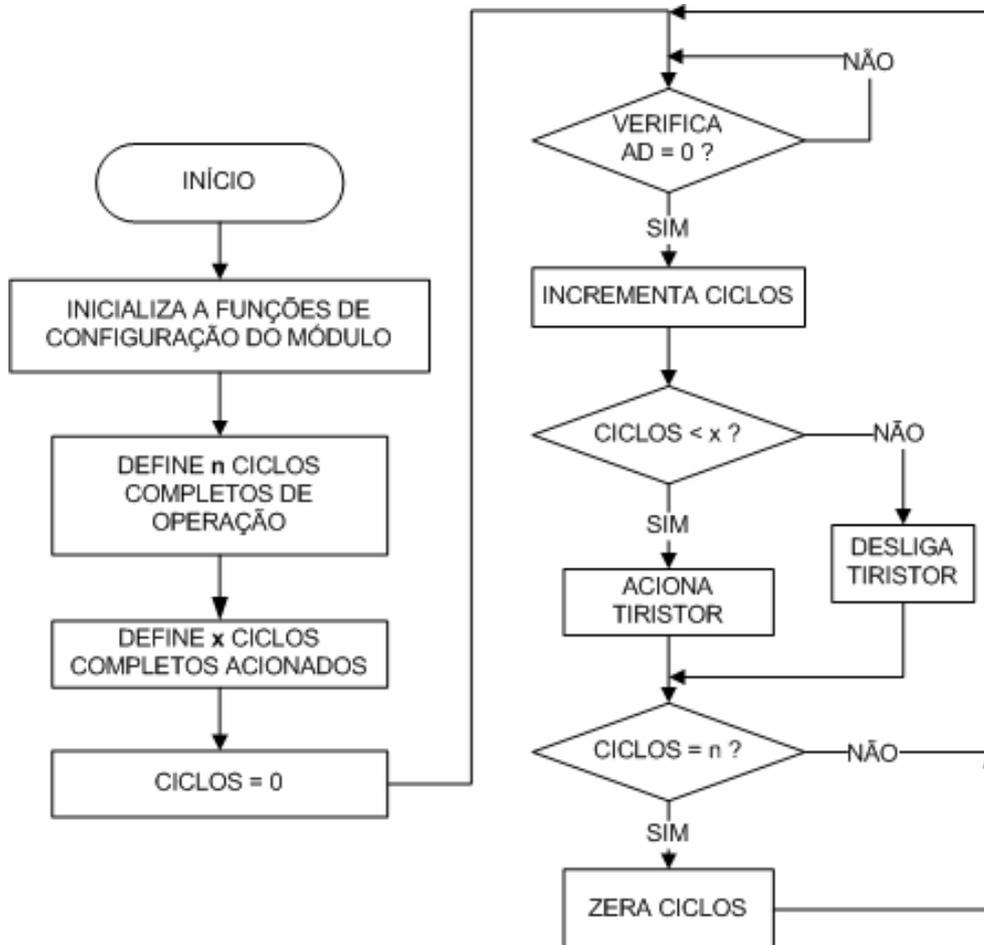
**5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste artigo apresentou-se um módulo didático para ensino e estudo de conversores em corrente alternada, objeto das disciplinas de Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos em Cursos Superiores de Tecnologia ou Engenharia e também em Cursos de Nível Técnico.

Com o desenvolvimento deste módulo, procurou-se aliar alguns conceitos importantes, quais sejam:

- a) baixo custo e alta robustez;
- b) flexibilidade para permitir diferentes aplicações e alterações futuras;
- c) fácil construção e manutenção por alunos ou professores;
- d) transparência em termos de *software* e *hardware*, quebrando a idéia de “caixa preta”, permitindo ao aluno o conhecimento total do módulo que está utilizando;
- e) pequeno volume e peso;
- f) integração de conhecimentos de eletrônica analógica e digital e, principalmente, eletrônica embarcada, foco do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos.

Dentre os conceitos acima citados, o de integração de conhecimentos é do ponto de vista didático-pedagógico, de grande importância, pois permite aos alunos a consolidação de conhecimentos dispersos das diversas disciplinas ou módulos do curso, unindo os mesmos em aplicações comuns do mercado tecnológico e fazendo com isso a sedimentação do conhecimento por eles adquirido.



**FIGURA 9 – Fluxograma básico para controle por ciclos inteiros.**



**FIGURA 10 – Aquisições em osciloscópio digital para o comportamento do sinal de saída para carga em relação ao sinal da rede elétrica para  $x/10$  ciclos completos.**

As aplicações apresentadas são as mais comuns em conversores de corrente alternada e podem facilmente, com alteração de *software*, serem estendidas e diversificadas. Ainda, é possível gerar problemas-tarefa, para que os estudantes busquem solucionar os mesmos *via* programação do microcontrolador ou então, de maneira mais ampla,

apresentem alterações no *hardware* do módulo didático, objetivando, com isso, o desenvolvimento de habilidades de projeto e desenvolvimento.

#### **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer aos estudantes da Disciplina de Conversores Estáticos,

da sexta fase do semestre de 2008/2 do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos, do Departamento Acadêmico de Eletrônica do IF-SC, em especial: Ana Carla Santos, Daniel Dezan de Bona, Luis Fernando Garcia e Manoela.

## REFERÊNCIAS

- BARBI, I. **Eletrônica de potência**. Florianópolis: Edição do Autor. 2005.
- CARMO, E. A.; SILVA, O. F.; BARREIROS, J. A. L.; FERREIRA, A. O. **Construção de Protótipo Didático: uma abordagem diferenciada no processo de ensino/aprendizagem de engenharia**, XVI CBA, Salvador, Brasil. 2006.
- ERICKSON, R. W. **Fundamentals of power electronics**. New York: Chapman & Hall. 1997. 1997.
- GARCIA, P. F. D. **Ensino orientado ao projeto desafio: uma experiência para o ensino de controle, instrumentação e eletrônica**. Congresso Brasileiro para Ensino de Engenharia, setembro, 2007. Curitiba, PR.
- GARCIA, F. S.; FERREIRA, A. A.; POMILIO J. A. Plataforma de ensino de eletrônica de potência versátil e de baixo custo; **Eletrônica de Potência**, vol. 13, no. 2, maio de 2008.
- LANDER, C. W. **Eletrônica Industrial: teoria e aplicações**. São Paulo: Mc-Graw Hill, 428 p. 1988.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics, converters, applications and design**. second edition 1995.
- NETO, O. M. **Uma reflexão sobre laboratórios didáticos nos cursos de engenharia**. Congresso Brasileiro para Ensino de Engenharia, setembro, 2007. Curitiba, PR.
- OLIVEIRA, J. C.; VENKATARAMANAN, G.; Teaching Power Electronics from the Control Point of View; **Eletrônica de Potência**, vol. 13, no. 2, maio de 2008.
- PETRY, C. A. **Estabilizador de Tensão Alternada para Cargas Não-Lineares**. Florianópolis, SC – Brasil, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- PETRY, C. A. **Estabilizadores de tensão alternada para alimentação de cargas não-lineares: estudo de variações topológicas e métodos de controle**. Florianópolis, SC – Brasil, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SILVA, C. D.; SILVEIRA, A. S.; SILVA, O. F.; BAYMA, R. S.; BARREIROS, J. A. L. **Ferramenta computacional em Labview para uso do protótipo didático: Servomotor CC**, XVI CBA, Salvador, Brasil. 2006.
- VENDRUSCULO, E. A.; FERREIRA, A. A.; POMILIO J. A. Plataforma didática para avaliação rápida e experimental de estratégias de controle em eletrônica de potência; **Eletrônica de Potência**, vol. 13, no. 2, maio de 2008.