

LABORATÓRIO MODULAR DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Luís Guilherme Barbosa Rolim

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.
(Presidente)

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

Prof. Luiz Pereira Calôba, Dr. Ing.

Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, R.J. - BRASIL

MARÇO DE 1993

ROLIM, LUÍS GUILHERME BARBOSA

Laboratório Modular de Eletrônica de Potência [Rio de Janeiro]
1993. VII, 106 pag., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia
Elétrica, 1993).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Laboratório Didático de Eletrônica de Potência

I. COPPE/UFRJ

II. Título (Série)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Richard Magdalena Stephan, pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao Prof. Edson Hirokazu Watanabe, pelas valiosas sugestões e contribuições para a realização deste trabalho.

Aos amigos do Departamento de Eletrotécnica da EE/UFRJ, pelo incentivo para a realização deste trabalho.

À minha família, pela tranquilidade que me proporcionou, tão necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

LABORATÓRIO MODULAR DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Luís Guilherme Barbosa Rolim

MARÇO, 1993

Orientadores: Prof. Walter Issamu Suemitsu

Prof. Richard Magdalena Stephan

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho é apresentado um laboratório didático para o ensino de Eletrônica de Potência. Seu desenvolvimento foi motivado pela constatação de uma carência de equipamentos de laboratório adequados para o ensino da referida disciplina.

A concepção do equipamento baseia-se na idéia de matriz-chaveamento, proposta por Wood (1981). A implementação é feita segundo uma estrutura modular, com o controle do acionamento das chaves sendo feito por software.

A partir das especificações acima citadas, foi construído um protótipo, cujo projeto é apresentado detalhadamente. São mostrados exemplos de utilização, a título de validação experimental. Concluindo, são apresentadas sugestões para o desenvolvimento futuro do tema deste trabalho.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

POWER ELECTRONICS MODULAR LABORATORY

Luís Guilherme Barbosa Rolim

MARCH, 1993

Supervisors: Prof. Walter Issamu Suemitsu

Prof. Richard Magdalena Stephan

Department: Electrical Engineering

This work presents an educational laboratory for teaching Power Electronics. The development of the laboratory was motivated by a lack of suitable equipment for teaching Power Electronics.

The conception of the equipment was based on the idea of switching matrix, proposed by Wood (1981). The implementation is done in a modular structure, with the switching control being realized by software.

A prototype was constructed according to the above specifications, and its project is shown with details. Application examples are shown, for validation purposes. At last, suggestions for further development of this work are presented.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 - Introdução	1
I.2 - Motivação	6
I.3 - Objetivos	9
I.4 - Sumário	10

CAPÍTULO II - CONCEPÇÃO

II.1 - Introdução	12
II.2 - Concepção	13
II.3 - Conclusão	24

CAPÍTULO III - PROJETO

III.1 - Introdução	26
III.2 - Módulos de Alimentação	27
III.3 - Módulos de Cargas	30
III.4 - Módulos de Chaves	33
III.5 - Módulo de Interfaces	42
III.6 - Módulo de Controle	52
III.7 - Arranjo Físico dos Módulos	57
III.8 - Conclusão	61

CAPÍTULO IV - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

IV.1 - Introdução	63
IV.2 - Exemplos de Utilização	64
IV.3 - Outras Aplicações	86

IV.4 - Conclusão	95
------------------------	----

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

V.1 - Conclusões	96
------------------------	----

REFERÊNCIAS	99
-------------------	----

APÊNDICE A

A.1 - FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS DIDÁTICOS	101
---	-----

APÊNDICE B

B.1 - SÍMBOLOS UTILIZADOS NO SOFTWARE DE CONTROLE	102
---	-----

B.2 - LISTAGENS DO SOFTWARE DE CONTROLE	103
---	-----

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1 - INTRODUÇÃO

Eletrônica de Potência é uma tecnologia utilizada no processamento da energia elétrica visando obter maior eficiência e qualidade. Os métodos empregados em Eletrônica de Potência baseiam-se na utilização de dispositivos semicondutores operados em regime de chaveamento para realizar o controle do fluxo de energia e a conversão de formas de onda de tensões e correntes entre fontes e cargas (Wood, 1981), (Bose, 1992).

Várias outras técnicas e diversos dispositivos foram utilizados no passado para realizar estas funções. A título de exemplo, podemos citar: válvulas a vácuo, amplificadores magnéticos, conversores rotativos, etc. Contudo, tais dispositivos

apresentavam desvantagens como pouca confiabilidade e baixa eficiência, além de requerer manutenção freqüente. O aparecimento da Eletrônica de Potência proporcionou uma alternativa vantajosa para o processamento de energia, devido à baixa perda de energia no chaveamento somada à pouca necessidade de manutenção das chaves semicondutoras. A idéia de se fazer conversão de energia através do chaveamento surgiu nos anos 20, mas durante as três décadas subseqüentes teve pouca evolução. Isto foi devido à tecnologia dos dispositivos chaveadores então disponíveis (thyratrons, retificadores de arco de mercúrio, etc.), que eram caros, muito volumosos e pouco confiáveis. Com a invenção do tiristor, ao fim dos anos 50, iniciou-se um grande surto de evolução tecnológica da Eletrônica de Potência, que se estendeu pelos anos 60. Durante esta fase foram lançadas as bases teóricas da Eletrônica de Potência, com a realização de inúmeros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento. Desde então, o campo de aplicações da Eletrônica de Potência vem crescendo acentuadamente, apresentando-se atualmente a tendência de que todo aparelho elétrico venha a ser interfaceado com o sistema elétrico através de conversores eletrônicos de potência.

Nos anos 70, foi iniciada a implantação da Eletrônica de Potência em escala industrial. Daí em diante, o desenvolvimento paralelo da Microeletrônica tem contribuído significativamente para a contínua evolução da Eletrônica de Potência. Esta contribuição se dá principalmente em duas vertentes:

- circuitos de controle (microcontroladores, DSPs, etc.),
- desenvolvimento de chaves semicondutoras (SIT, MCT, etc.).

Da interação entre a Microeletrônica e a Eletrônica de Potência tem resultado uma crescente popularização dos conversores estáticos, sobretudo no acionamento de máquinas elétricas. No entanto, a utilização da Eletrônica de Potência não se

restringe apenas às aplicações industriais. O espectro de aplicações é tão amplo que vai desde simples aplicações residenciais tais como "dimmers" até sistemas de transmissão de energia elétrica de alta potência como CCAT e FACTS (Hingorani, 1988).

Uma implicação importante da utilização da Eletrônica de Potência é a conservação de energia elétrica. Diversos estudos (Hukai, 1985; Hicock, 1985; Eto, 1988), mostram que através do controle de velocidade com conversores estáticos é possível economizar até 30% da energia gasta em vários tipos de acionamentos de motores elétricos. Hukai (1985) mostra que deste modo pode-se economizar até cerca de 11% do capital necessário para a expansão da capacidade de geração no Brasil para a próxima década. O custo da implantação de controladores eletrônicos de velocidade numa indústria pode ser rapidamente compensado pela própria economia no consumo de energia elétrica. A aplicação de variadores de velocidade estáticos é uma prática recomendada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), criado em 1985 pela Eletrobrás e encampado em 1992 pelo Governo Federal.

Outro aspecto relevante da aplicação da Eletrônica de Potência é a redução dos impactos ambientais associados à produção e utilização de energia. Atualmente, tem-se falado bastante a respeito de fontes de energia ambientalmente "limpas", como células combustíveis, células fotovoltaicas, energia eólica, usinas maremotrizes, etc. Muitas destas fontes não são capazes de produzir energia na forma usualmente requerida pelo sistema elétrico, ou seja, tensão alternada de intensidade e frequência constante. Para acoplar estas fontes ao sistema elétrico é necessário algum tipo de conversor eletrônico de potência. A utilização de conversores estáticos em veículos de transporte elétricos também ajuda a reduzir a emissão de gases poluentes, contribuindo para o esforço global de preservação ambiental. Em vista das vantagens

proporcionadas pela Eletrônica de Potência, tem-se a expectativa de uma ampla difusão do uso de equipamentos eletrônicos de potência. Nos países desenvolvidos isto é de fato verificado. No Brasil, porém, o uso de equipamentos eletrônicos de potência é pouco difundido. Há vários fatores que contribuem para esta situação, dentre os quais destacam-se:

- o alto investimento atualmente requerido para implantação de sistemas eletrônicos de potência,
- o conservadorismo de algumas empresas nacionais, que relutam em absorver inovações tecnológicas,
- a pouca difusão do conhecimento das vantagens associadas às aplicações da Eletrônica de Potência,
- a falta de normalização para o setor, o que possibilita a produção e comercialização de equipamentos de qualidade inferior e diminui a confiança dos usuários na Eletrônica de Potência.

Se por um lado a Eletrônica de Potência oferece vantagens, por outro lado seu uso acarreta também alguns efeitos colaterais, resultantes da produção indesejável de harmônicos pelos conversores estáticos (Oliveira, 1992). Este é o preço que se tem que pagar pelos benefícios proporcionados pela Eletrônica de Potência. O engenheiro que aplica esta tecnologia, seja ele usuário ou projetista, tem que ter um bom conhecimento destes efeitos parasitas a fim de contorná-los adequadamente.

Embora no princípio a Eletrônica de Potência fosse uma disciplina especializada, hoje em dia ela é considerada uma disciplina básica na formação de

engenheiros eletricitas, sejam eles especialistas em sistemas de potência ou na área industrial. No entanto, o ensino da Eletrônica de Potência a nível de graduação não é muito desenvolvido no País. Este fato pode ser atribuído principalmente a dois fatores:

- A carência de docentes especializados, devido ao caráter multidisciplinar da Eletrônica de Potência. Um verdadeiro especialista nesta área deve ter alguma experiência em matérias tradicionalmente dissociadas como processamento de sinais, sistemas de potência, eletrônica digital, máquinas elétricas, computação e sistemas de controle (Bose, 1992). Há poucos profissionais com conhecimentos tão abrangentes.
- A carência de recursos laboratoriais adequados para complementar a formação teórica. A Eletrônica de Potência é uma disciplina que requer muita experimentação, seja através de simulações computacionais ou de montagens em laboratório. Isto requer equipamentos didáticos e softwares especializados, havendo poucas opções disponíveis no mercado.

Em Instituições de Ensino Superior (IES) onde há pesquisa e ensino de pós-graduação em Eletrônica de Potência, o primeiro fator geralmente não é relevante. Tomando como exemplo algumas Universidades Federais como UFRJ, UFSC, UFPb, etc., observa-se que nestas IES os cursos de graduação são ministrados por docentes-pesquisadores que atuam também na pós-graduação e são verdadeiros especialistas em Eletrônica de Potência. Além disso, estes docentes, em seus cursos de pós-graduação, também contribuem para a formação de novos especialistas para atuar em outras IES.

Este trabalho propõe-se a atacar o segundo fator que limita a difusão do ensino da Eletrônica de Potência no País, através da criação de um equipamento para ensino de laboratório desta disciplina.

I.2 - MOTIVAÇÃO

O ensino da Eletrônica de Potência em laboratório apresenta diversas alternativas de abordagem dependendo dos objetivos educacionais pretendidos. Equipamentos eletrônicos de potência são sistemas complexos, compostos de vários sub-sistemas que utilizam outras tecnologias como ferramentas. As alternativas de abordagem referem-se ao grau de detalhamento com que estes sub-sistemas são tratados. Por exemplo, quando se estuda a teoria de operação de conversores estáticos, os circuitos de controle geralmente são tratados como caixas-pretas. Este tratamento já não é adequado para o estudo das características de comutação das chaves semicondutoras. Os requisitos de instrumentação e de circuitos auxiliares são também diferentes conforme a abordagem adotada. Foi realizado um levantamento sobre a produção de equipamentos didáticos para Eletrônica de Potência com a intenção de avaliar as características didáticas destes equipamentos. Foram feitas as seguintes constatações:

- A produção comercial deste tipo de equipamento é pequena: foram encontrados apenas oito fabricantes em todo o mundo, relacionados no apêndice A. Os equipamentos produzidos comercialmente são mais adequados para treinamento do que para aprendizagem de princípios de funcionamento. Na maioria, são compostos por unidades autônomas dedicadas. Ou seja, cada unidade realiza apenas uma função de conversão,

fazendo com que se tenha que lidar com uma grande quantidade de hardware para se poder ter um elenco de experiências razoável. As unidades em geral não são reconfiguráveis e reproduzem apenas as funções de conversão mais utilizadas na indústria, o que limita as possibilidades de uso.

- Muitas Universidades estrangeiras (Lataire, 1987; Robinson, 1987; Hobson, 1986; Finch, 1990; Yeung, 1990; Rey, 1991; Bonert, 1987; Dewan, 1979; Novotny, 1990; Miller, 1991; Krein, 1991) construíram seus próprios equipamentos de laboratório, buscando uma versatilidade maior do que a dos equipamentos didáticos disponíveis no mercado.

Foi também observado que a maioria dos equipamentos avaliados, comerciais ou não, segue uma mesma filosofia didática, que é muito difundida no ensino da Eletrônica de Potência. Trata-se da tendência de se conduzir o ensino da disciplina através de uma série de estudos-de-caso, tratando cada configuração de conversor isoladamente. Neste trabalho propõe-se uma abordagem diferente, por acreditar-se que as semelhanças topológicas e funcionais entre as diferentes categorias de conversores estáticos possam ser exploradas didaticamente. Com o laboratório concebido segundo esta nova abordagem, pretende-se atingir principalmente os seguintes objetivos educacionais:

- consolidar os princípios fundamentais de operação dos conversores estáticos tais como funções de conversão, técnicas de controle, etc.
- dar ao estudante uma visão sistêmica da estrutura funcional dos conversores estáticos.

- possibilitar ao estudante o exercício da capacidade de síntese, através da construção de sistemas eletrônicos de potência a partir de blocos funcionais.
- familiarizar o estudante com algumas aplicações típicas dos conversores estáticos.

A filosofia didática adotada baseia-se na teorização proposta por Wood (1981) para a análise dos conversores estáticos. Em seu trabalho, Wood descreve genericamente um conversor estático qualquer como sendo uma matriz de chaves semicondutoras (figura I.1). Nesta matriz física, chamada matriz-chaveamento, a operação de cada chave é descrita por uma função binária chamada função-chaveamento. Com isto, a operação do conversor pode ser globalmente descrita por uma matriz algébrica chamada matriz de funções-chaveamento, na qual cada elemento é a função-chaveamento correspondente a uma das chaves do conversor.

Esta teorização, embora não seja ainda muito utilizada, possui um grande valor didático. O tratamento unificado dado por ela facilita a compreensão do funcionamento dos conversores estáticos. Utilizando-se esta abordagem como filosofia de projeto, objetiva-se minimizar a quantidade de hardware necessária para realizar os vários tipos de funções de conversão. A descrição generalizada que é dada ao controle das chaves é perfeitamente adequada para a sua implementação em software utilizando computadores pessoais. Isto permite que se construa um equipamento didático de baixo custo e possibilita uma participação muito mais interativa do aluno no estudo da Eletrônica de Potência.

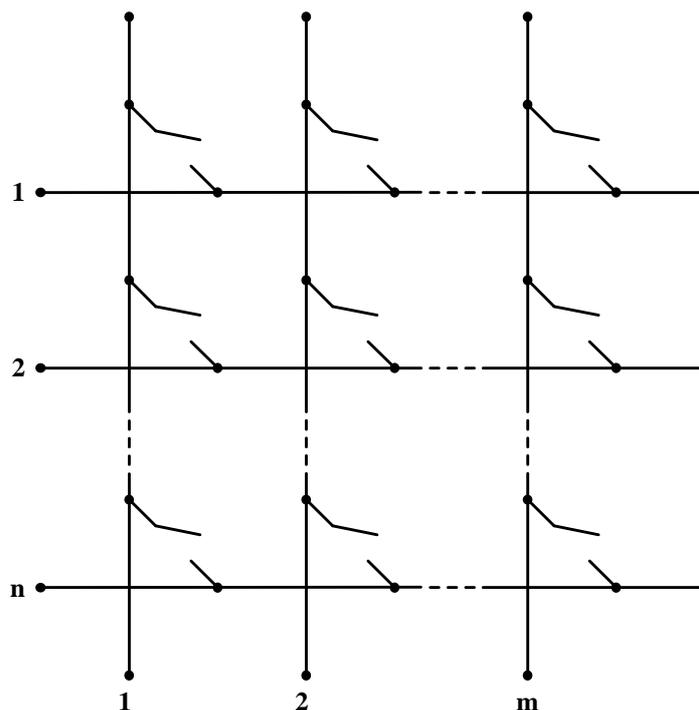


Figura I.1 - Matriz-chaveamento

I.3 - OBJETIVOS

A teoria da matriz-chaveamento tem um grande potencial didático no sentido de tornar mais fácil a compreensão dos conceitos fundamentais da Eletrônica de Potência e dos princípios básicos de funcionamento dos conversores estáticos. Este trabalho se propõe a desenvolver um laboratório didático para o estudo da Eletrônica de Potência, com base na teoria da matriz-chaveamento. Pretende-se que este laboratório seja dotado de facilidades operacionais que permitam explorar da maneira mais plena possível o potencial daquela teoria. Os principais elementos deste trabalho são:

- a concepção de uma estrutura básica para os equipamentos deste laboratório,

- o projeto detalhado destes equipamentos,
- a construção de protótipos e interfaceamento com um computador pessoal,
- o desenvolvimento de software para o controle do equipamento,
- a validação do sistema completo através de exemplos de aplicação,
- a apresentação de conclusões sobre a validação do sistema e a sugestão de melhorias e desenvolvimento do que foi feito.

I.4 - SUMÁRIO

Neste capítulo foi apresentado um breve arrazoado que serviu de introdução ao escopo deste trabalho.

No capítulo II é desenvolvida a concepção do laboratório, apresentando-se as idéias principais que servem de orientação para o projeto dos seus componentes. A inter-relação entre estes componentes é mostrada em forma de diagramas de blocos.

No capítulo III é descrito detalhadamente o projeto dos equipamentos do laboratório e apresentado o protótipo construído segundo este projeto.

No capítulo IV são mostrados exemplos de utilização dos equipamentos, a título de validação experimental do protótipo construído.

Por fim, no capítulo V são apresentadas conclusões e sugestões de aplicações e de melhorias do laboratório.

CAPÍTULO II - CONCEPÇÃO

II.1 - INTRODUÇÃO

No Capítulo I, foi mencionado que a teoria da matriz-chaveamento tem um grande potencial para aplicações didáticas. A modelagem unificada dada por esta teoria facilita a compreensão dos princípios fundamentais de operação dos conversores estáticos. Contudo, a idéia da matriz-chaveamento não é muito difundida. A maior parte do material didático disponível para o ensino básico da Eletrônica de Potência adota metodologias educacionais baseadas no estudo de casos isolados.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um laboratório didático de Eletrônica de Potência, no qual a idéia da matriz-chaveamento seja utilizada como

filosofia de projeto. Deste modo, pretende-se produzir um sistema de laboratório versátil, com o qual possam ser rapidamente implementados conversores de diversas topologias e diversas funções de conversão, utilizando-se um mínimo de equipamento.

Neste capítulo, é desenvolvida a concepção básica deste laboratório didático de Eletrônica de Potência. Inicialmente, é apresentada uma descrição estrutural generalizada para sistemas eletrônicos de potência, a partir da qual são derivadas diretrizes globais para o projeto do laboratório. Em seguida, é feito um detalhamento em termos de especificações para o projeto das partes componentes do laboratório.

II.2 - CONCEPÇÃO

Conforme foi dito no Capítulo I, o sistema proposto neste trabalho destina-se principalmente ao estudo dos princípios básicos de operação dos conversores estáticos. Para isto, será utilizada a modelagem proposta por Wood (1981). Nesta modelagem, um conversor estático de função genérica é representado pela matriz-chaveamento mostrada na figura II.1, que possui m terminais de entrada e n terminais de saída. Aos terminais de entrada conectam-se os m terminais da fonte de alimentação, que pode ser contínua ou alternada, monofásica ou polifásica. Aos terminais de saída são conectados os n terminais da carga.

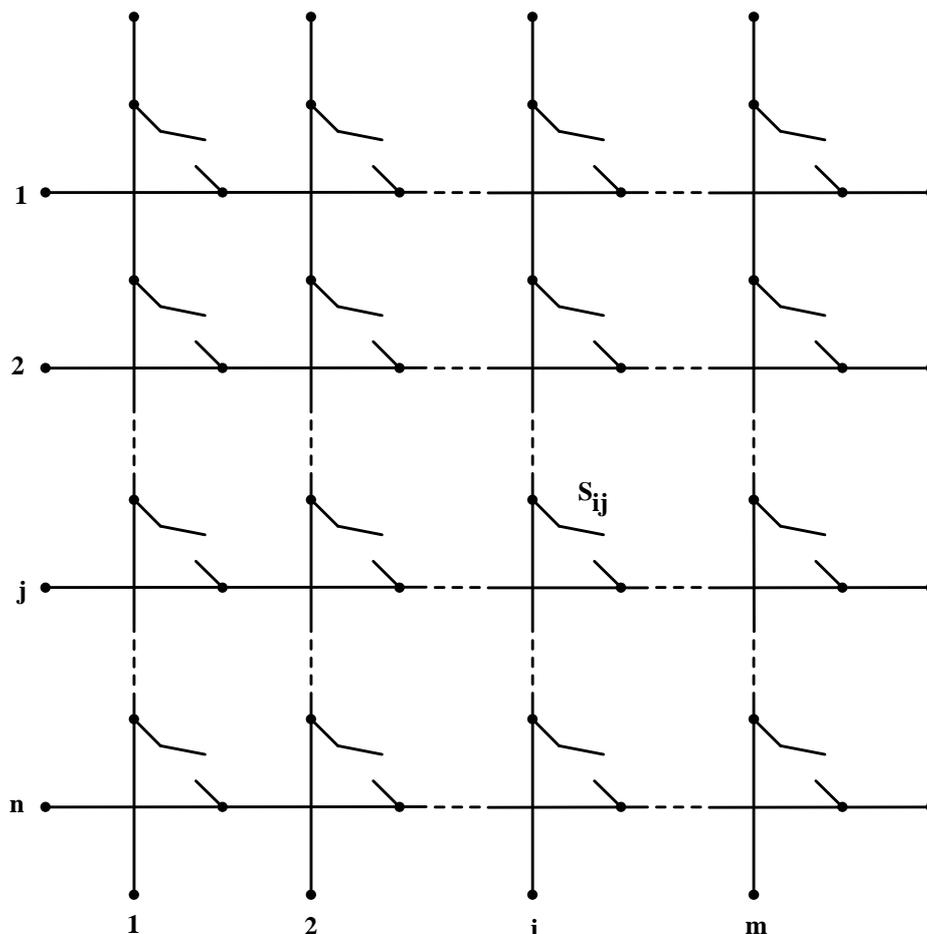


Fig. II.1 - Matriz-chaveamento genérica

A operação da chave S_{ij} , que liga o terminal de entrada i ao terminal de saída j , é descrita matematicamente pela função-chaveamento H_{ij} . Uma função-chaveamento é uma função binária que assume valor um, se a chave correspondente está fechada, ou valor zero, se a chave está aberta. Se aos terminais de entrada são aplicadas tensões V_i^{in} em relação a uma referência comum, então a tensão no terminal de saída j , V_j^{out} , em relação à mesma referência das tensões de entrada, é dada por:

$$V_j^{out} = \sum_{i=1}^n H_{ij} V_i^{in} \quad (II.1)$$

A corrente I_i^{in} injetada no terminal i da entrada está relacionada às correntes I_j^{out} drenadas nos terminais de saída da seguinte forma:

$$I_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^n H_{ij} I_j^{\text{out}} \quad (\text{II.2})$$

As relações expressas pelas equações (II.1) e (II.2) podem ser escritas de forma mais compacta através das seguintes expressões matriciais:

$$[\mathbf{V}^{\text{out}}]_{n \times 1} = [\mathbf{H}]_{n \times m} [\mathbf{V}^{\text{in}}]_{m \times 1} \quad (\text{II.3})$$

$$[\mathbf{I}^{\text{in}}]_{m \times 1} = [\mathbf{H}]'_{m \times n} [\mathbf{I}^{\text{out}}]_{n \times 1} \quad (\text{II.4})$$

Onde $[\mathbf{H}]'_{m \times n}$ é a transposta da matriz $[\mathbf{H}]_{n \times m}$.

Na situação em que as fontes de alimentação impõem as tensões nos terminais de entrada, a seqüência de operação das chaves deve obedecer aos seguintes princípios:

- chaves conectadas a um mesmo terminal de saída nunca podem ser fechadas simultaneamente, pois isto violará a lei das tensões de Kirchhoff na entrada.
- em qualquer instante de tempo, ao menos uma das chaves ligadas a um dado terminal de saída deve estar fechada, ou a corrente na carga será descontínua.

Caso as fontes de alimentação imponham correntes de entrada em vez de tensões, a operação do conversor deve obedecer a princípios duais aos mencionados acima (Wood, 1981).

No projeto deste laboratório, foi assumido como compromisso básico que o desenho do equipamento deve expressar visualmente a idéia da matriz-chaveamento. Com isto, pretende-se proporcionar uma compreensão facilitada deste conceito. Para se conseguir esta visualização, a montagem das chaves semicondutoras e das vias de interligação dos terminais de entrada e saída deve ser feita segundo um posicionamento análogo ao mostrado no diagrama esquemático da matriz-chaveamento da figura II.1. Entretanto, deve ser imposto um limite à quantidade de terminais de entrada e de saída por razões óbvias. Estas quantidades foram escolhidas em função das topologias mais complexas que se pretende implementar no equipamento. São elas:

- ponte retificadora trifásica,
- ponte inversora trifásica,
- chopper de 4 quadrantes,
- controlador de tensão alternada trifásica.

Pode-se verificar que estas topologias necessitam de não mais que três terminais de entrada e/ou três terminais de saída. Portanto, foi decidido que a matriz de chaves do equipamento tenha exatamente três terminais de entrada e três terminais de saída, dispondo de um total de nove posições para colocação de chaves. Na figura II.2 é mostrada esta matriz-chaveamento 3 x 3, na qual se baseia o design do equipamento. A numeração das chaves mostrada na figura II.2 foi arbitrada, servindo apenas como padrão para referências posteriores.

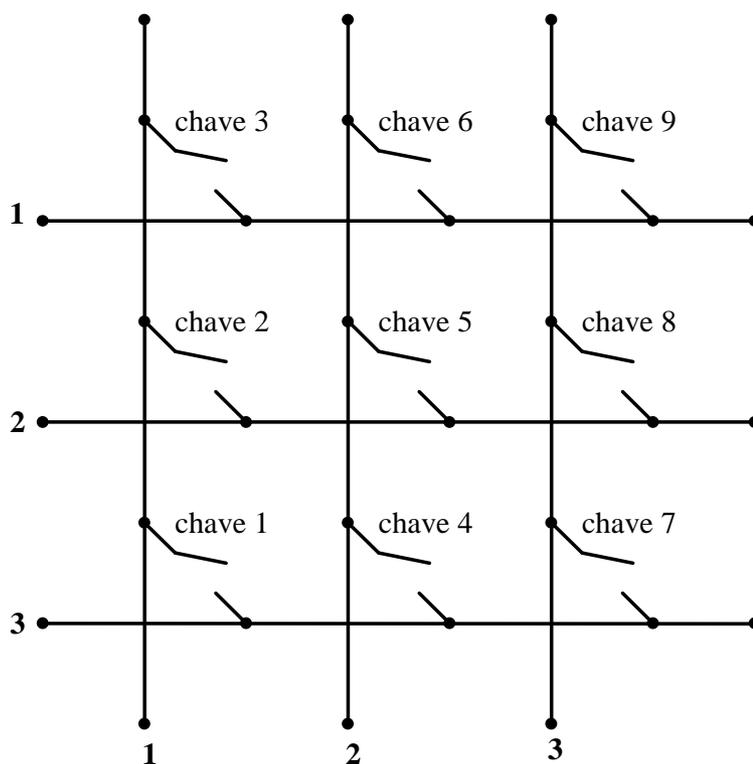


Fig. II.2 - Matriz-chaveamento 3 x 3

No estudo de um conversor estático através da matriz-chaveamento, as chaves semicondutoras que compõem este conversor são tratadas de uma maneira generalizada como chaves ideais bidirecionais em corrente e tensão. Porém, na aprendizagem de fundamentos da operação de conversores, é importante enfatizar o aspecto da seleção dos dispositivos semicondutores de acordo com a função de conversão a ser realizada. É também importante a compreensão das relações entre a topologia do conversor e as características do dispositivo semicondutor utilizado como chave.

Acredita-se que a compreensão dos aspectos de seleção de chaves é facilitada se o estudante é solicitado a trabalhar sobre eles. Por isto, foi decidido que a estrutura

mecânica do equipamento deve permitir que as chaves da matriz consistam em módulos removíveis e intercambiáveis. Deve-se dispor de vários conjuntos de módulos de chaves, cada conjunto utilizando um certo tipo de dispositivo semiconductor. Na montagem de um determinado conversor, as chaves apropriadas devem ser selecionadas pelo aluno e montadas entre as vias de interligação dos terminais de entrada e saída da matriz-chaveamento. A estrutura da matriz é suportada por um bastidor dotado de sistemas de conexão apropriados.

Vale dizer que a possibilidade de se intercambiar as chaves da matriz-chaveamento confere uma certa versatilidade ao equipamento, porque permite implementar vários tipos de conversores sobre uma mesma base de montagem. Além disso, com a modularização das chaves, reduz-se o volume de hardware necessário para estas implementações. Contudo, a fim de assegurar a versatilidade do equipamento de uma forma global, deve-se prover facilidades para permitir intercambiar também as fontes de alimentação, as cargas e a forma de controle das chaves (as funções-chaveamento). Isto requer a modularização de outras partes do equipamento.

A fim de se conseguir flexibilidade no controle das chaves, decidiu-se realizar este controle por intermédio de um computador pessoal. De outro modo, seria necessário construir uma grande quantidade de circuitos de controle para que se conseguisse implementar uma boa variedade de conversores. As funções de controle são implementadas em software, ficando o hardware limitado às interfaces do computador de controle com os outros módulos. Uma vantagem adicional do controle por computador é que ele permite que o aluno trabalhe diretamente na programação da operação das chaves, donde se pode extrair bons resultados didáticos. Também por razões didáticas, definiu-se que o sinal de controle enviado a uma dada chave

deve ter uma forma de onda análoga à função-chaveamento programada para esta chave.

Diversos autores (Dewan, 1975; Rashid, 1988) costumam descrever sistemas eletrônicos de potência típicos como sendo sistemas de controle realimentados, como aquele mostrado no diagrama de blocos da figura II.3. Com base nesta descrição e nas idéias apresentadas nos parágrafos anteriores, foi concebida uma estrutura modular para o laboratório proposto neste trabalho. Os módulos que compõem esta estrutura correspondem aos blocos do diagrama e constituem unidades independentes interconectadas através do bastidor de montagem do equipamento.

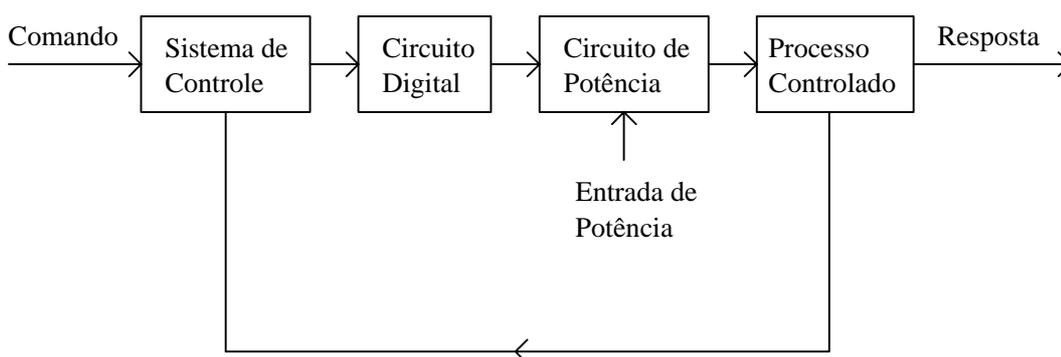


Figura II.3 - Diagrama de Blocos de um sistema eletrônico de potência genérico

Os módulos do equipamento são especificados resumidamente a seguir:

- **módulos de alimentação:** consistem nas fontes mais comumente utilizadas na alimentação de conversores estáticos, tais como fontes de tensão contínua, alternada monofásica e alternada trifásica. Correspondem à entrada de potência no diagrama de blocos da figura II.3.

- **módulos de cargas:** são compostos por algumas cargas típicas de conversores estáticos, entre as quais se incluem cargas passivas resistivas e indutivas, motores de corrente contínua e de corrente alternada. Correspondem ao bloco rotulado "processo controlado" no diagrama da figura II.3.
- **módulos de chaves:** são providos conjuntos de chaves separados para as diferentes funções de conversão (CA/CC, CC/CA, CC/CC, CA/CA), utilizando diferentes tipos de dispositivos semicondutores. Chaves baseadas em novos dispositivos podem ser facilmente incluídas no equipamento com a construção de novos módulos de chaves. Correspondem ao bloco rotulado "circuito de potência" no diagrama da figura II.3.
- **módulo de controle:** consiste basicamente num computador pessoal, onde as funções de controle são implementadas em software. Este módulo controla a operação das chaves segundo informações do operador e leituras de sinais externos. Corresponde ao bloco rotulado "sistema de controle" na figura II.3.
- **módulo de interfaces:** contém os circuitos que fazem a conversão entre os comandos de software do módulo de controle e os sinais enviados aos módulos de chaves. Faz também as leituras dos sinais externos que são realimentados ao módulo de controle. Corresponde ao bloco rotulado "circuitos digitais" na figura II.3.

Na figura II.4 é mostrado um outro diagrama de blocos que descreve as relações funcionais entre os módulos do equipamento.

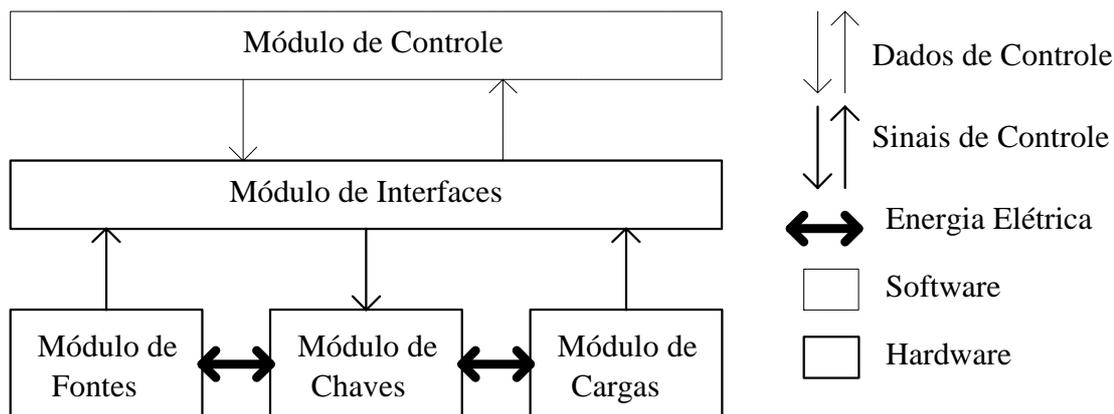


Fig. II.4 - Módulos do laboratório

Além das características descritas acima, o design dos equipamentos do laboratório deve obedecer a alguns princípios ergonômicos, a fim de que lhes seja assegurada funcionalidade no uso rotineiro. Estes princípios podem ser resumidos em quatro itens: segurança, facilidade de uso, facilidade de manutenção e expansibilidade. Estes pontos são discutidos a seguir.

- segurança:** o equipamento não deve oferecer riscos aos seus usuários quando em operação normal ou mesmo quando ocorrer mau funcionamento. O tipo de controle proposto oferece ampla liberdade na programação da operação das chaves da matriz-chaveamento. Por outro lado, ele cria possibilidades de ocorrência de falhas na operação. Considerando-se ainda o fato de o equipamento ser destinado ao manuseio direto por parte de estudantes inexperientes, tem-se uma probabilidade não-desprezível de ocorrência de falhas. Por isso, o equipamento deve também tolerar as falhas decorrentes de erros na programação da operação das chaves, mantendo sua integridade; ou seja: deve exibir robustez. Contudo, é importante salientar que o equipamento

deve sempre tornar claramente identificáveis para o usuário as falhas na operação, a fim de que as mesmas possam ser didaticamente evidenciadas. As conseqüências dos erros não devem ser completamente atenuadas, para que não se perca o efeito psicológico da penalização pelo erro, que é favorável à aprendizagem. Espera-se que uma proteção concebida desta forma contribua para tornar o usuário sempre atento para princípios de segurança na programação do acionamento das chaves de um conversor estático, como por exemplo a não-ligação simultânea de fontes de tensão e a utilização de diodos "free-wheeling".

Durante o funcionamento normal do equipamento, o principal fator de risco para o usuário é a possibilidade de contato com partes energizadas. Para proteger o usuário contra este tipo de risco, decidiu-se adotar níveis reduzidos de tensão de alimentação e limitar também a capacidade de carga das fontes de alimentação. Cabe ressaltar que estas medidas por si só também proporcionam alguma segurança contra defeitos, tanto para o usuário quanto para o próprio equipamento, uma vez que tornam potencialmente menos destrutivos os efeitos de possíveis falhas de operação. A segurança contra defeitos deve ser complementada por um sistema de proteção em dois níveis:

1. ao nível do software de controle, com caráter preventivo e diagnóstico, realizando testes de validação das funções-chaveamento.
2. a nível de hardware, com caráter de retaguarda, realizando proteção contra sobrecargas e curto-circuitos.

- **facilidade de uso:** o grau de facilidade de uso de um equipamento didático deve ser escolhido com muito cuidado, pois neste ponto os aspectos ergonômicos confundem-se com aspectos didáticos. Se por um lado a aprendizagem pode ser facilitada quando o aluno é liberado da necessidade de realizar montagens complexas, por outro lado o excesso de automatismo pode ter efeitos negativos para o ensino. Na concepção deste laboratório, tenta-se explorar didaticamente a participação do aluno na montagem e na operação do equipamento, projetando-se as interfaces homem-máquina e os sistemas de conexão entre os módulos, de modo a requerer interação do usuário de uma forma dinâmica e estimulante para o raciocínio. A atenção do aluno deve ser concentrada sobre o conteúdo didático das experiências executadas no equipamento. Portanto, os procedimentos de manipulação necessários à preparação e à execução destas experiências não devem demandar muita concentração do aluno, para não desviar sua atenção do conteúdo da experiência e não desmotivá-lo. Neste ponto, convém frisar que estes equipamentos de laboratório são apenas ferramentas para atividades didáticas e como tais não devem ser excessivamente difíceis de usar, para que o conteúdo educacional das atividades não seja subvalorizado. Embora o equipamento possa ser mais complexo na sua concepção do que os assuntos que se pretende ensinar com ele, para o usuário ele deve parecer o mais simples possível, a fim de ser didaticamente eficiente. Esta simplicidade é proporcionada principalmente pelas facilidades incorporadas aos módulos de interface e controle. Este último tem um papel de destaque pois é o mediador da maioria das interações do usuário com o equipamento, através do software de controle. Este software deve então possuir uma interface simples e amigável com o usuário.

- **facilidade de manutenção:** o bom desempenho de um equipamento didático depende fortemente da sua resistência à rotina de uso. Esta característica está diretamente relacionada à robustez do equipamento, uma propriedade delineada no item segurança, apresentado acima. Pelo fato de ser destinado ao manuseio direto por alunos, o equipamento provavelmente sofrerá constantemente agressões decorrentes de erros de montagem ou de operação, às quais deve resistir. Contudo, no dia-a-dia sempre há possibilidade de alguma contingência provocar defeito no equipamento. Nessas situações, é preciso garantir o seu retorno ao uso com a maior rapidez possível. Portanto, a manutenção do equipamento deve ser fácil e rápida, razão pela qual o projeto dos circuitos auxiliares deve orientar-se pelas seguintes diretrizes:

1. utilizar componentes populares e de baixo custo,
2. restringir a complexidade e o volume de hardware ao mínimo indispensável; esta diretriz é condizente com a concentração das funções de controle em software, prevista na especificação do módulo de controle.

- **expansibilidade:** um aspecto importante, também relacionado à manutenção, é a facilidade de se incorporar novos dispositivos ou técnicas de controle ao equipamento. Com a modularização e a realização do controle por software, isto é somente uma questão de reprogramação e substituição de uns poucos módulos. Deste modo, consegue-se alguma prevenção contra obsolescência. Esta é uma característica importante num equipamento para ensino de Eletrônica de Potência, uma tecnologia que vem constantemente

desenvolvendo novos métodos e dispositivos, enquanto torna obsoletos outros tantos.

II.3 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentadas as idéias básicas que orientam a concepção do laboratório didático proposto neste trabalho. A partir destas idéias, foi feita uma especificação mais detalhada da estrutura do equipamento e de suas partes constituintes. As principais características propostas nesta especificação são:

- concepção baseada na idéia de matriz-chaveamento,
- modularização,
- controle por computador.

No capítulo III, será apresentado o desenvolvimento do projeto construtivo do equipamento, com base nas especificações apresentadas no presente capítulo.

CAPÍTULO III - PROJETO

III.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o projeto dos circuitos e do software de controle dos módulos do laboratório desenvolvido neste trabalho, de acordo com as especificações fornecidas no capítulo II.

A proposta de uma concepção modular baseada intensivamente em software resultou em simplicidade no projeto dos circuitos auxiliares, contribuindo para o desenvolvimento de um equipamento robusto, de baixo custo e de fácil manutenção. Tais propriedades são de grande importância para um equipamento didático destinado ao uso rotineiro com manuseio direto por estudantes. Por outro lado, a necessidade de proporcionar facilidade de interação do usuário com o equipamento,

de uma maneira segura e compreensiva, requer um cuidadoso projeto do software de controle.

Nas cinco próximas seções deste capítulo, são apresentados os projetos de cada um dos módulos do equipamento, conforme foram implementados no protótipo desenvolvido. Nestas seções são dadas apenas descrições esquemáticas dos circuitos e do algoritmo básico do software de controle. Logo após, é mostrado o arranjo físico dos módulos e da base de montagem que lhes dá suporte mecânico. Ao final do capítulo são apresentadas conclusões sobre o projeto.

III.2 - MÓDULOS DE ALIMENTAÇÃO

Três tipos de alimentação são necessários no universo de aplicações pretendidas para o equipamento aqui concebido. São elas:

- contínua
- alternada monofásica
- alternada trifásica

Os circuitos que fornecerão estas alimentações devem obedecer aos princípios de segurança prescritos no capítulo II. Neste particular, a maior preocupação no projeto dos circuitos de alimentação é com a segurança do usuário, pois estes circuitos constituem a principal fonte de riscos para o estudante que utiliza o equipamento.

Os níveis de tensão e a forma de ligação das fontes de alimentação devem ser escolhidos de modo a minimizar os riscos de choque elétrico. Bernstein (1991) mostra que uma corrente alternada de apenas 6 mA RMS através do tecido muscular já é suficiente para que aproximadamente 0,5% de pessoas do sexo feminino percam a coordenação motora e não consigam largar o objeto causador do choque. No interior de um laboratório esta perda de coordenação pode ser bastante perigosa. O nível de tensão necessário para fazer circular aquela corrente varia muito com a forma de contato entre o corpo da pessoa e o objeto energizado. Na utilização de um equipamento de laboratório como este, é provável que, em caso de choque, o contato seja feito sob condição de pele seca, podendo apresentar resistência de contato da ordem de 10^5 Ohm (Bernstein, 1991). A presença de umidade na pele pode fazer a resistência cair a cerca de 10% de seu valor a seco. Nesta situação, a tensão causadora de um choque que abale a coordenação motora pode ser tão baixa quanto mostrado no cálculo a seguir:

$$V_{\text{choque}} = 0,1 \times 10^5 \times 0,006 = 60V \text{ RMS}$$

Agindo de forma conservativa, foi tomado como nível máximo de tensão nominal para os circuitos de alimentação o valor de 30V RMS, ou seja, metade da tensão que apresenta risco de choque. Para a alimentação trifásica este deve ser o valor nominal da tensão eficaz entre fases (tensão de linha). Para fontes de alimentação contínua, não se verificam efeitos de choque elétrico neste nível de tensão. Contudo, o nível máximo de tensão de alimentação de 30V foi mantido a título de padronização.

A especificação de baixos níveis de tensão de alimentação torna necessária a utilização de transformadores abaixadores de tensão na seção de entrada dos circuitos de alimentação. Esta medida torna mínimos os riscos de dano pessoal por choque

elétrico durante a operação normal dos módulos de alimentação. Entretanto, no caso de uma falha no isolamento entre um enrolamento primário e um secundário do transformador de entrada, a seção de saída do circuito de alimentação pode apresentar tensão elevada em relação à terra, oferecendo risco de choque. Para evitar este tipo de problema, a saída dos circuitos de alimentação deve receber um aterramento de proteção (Bernstein, 1991).

No módulo de alimentação alternada trifásica, o aterramento deve ser feito no neutro do circuito secundário. Contudo, o neutro do circuito primário também deve ser solidamente aterrado ou conectado ao neutro da rede de alimentação primária, a fim de prover um caminho de baixa impedância para a corrente de sequência zero decorrente de uma falta monofásica secundária, garantindo a correta operação de dispositivos de proteção colocados no circuito secundário.

A capacidade nominal de corrente dos módulos de alimentação foi determinada com base no projeto dos módulos de cargas. Foi adotado o valor de 2A como capacidade nominal padronizada. As razões desta escolha são apresentadas juntamente com a descrição dos módulos de cargas, na próxima seção. A saída dos módulos de alimentação é protegida contra sobrecorrentes por fusíveis e é dotada de chave seccionadora, conforme é mostrado esquematicamente na figura III.1.

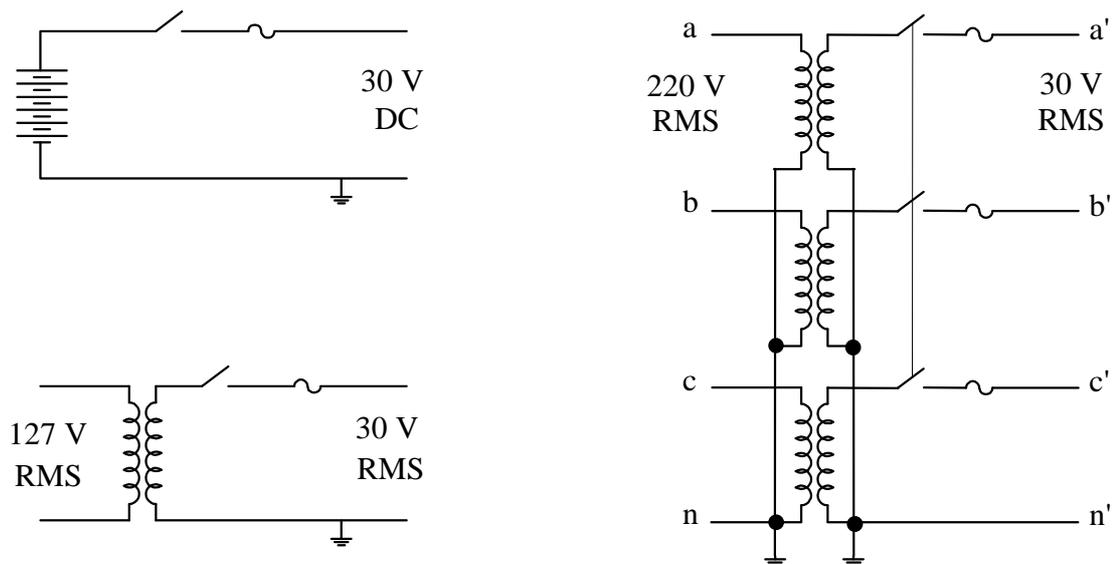


Figura III.1 - Módulos de Alimentação

III.3 - MÓDULOS DE CARGAS

Dois importantes aspectos do ensino-aprendizagem da Eletrônica de Potência são o estudo do comportamento das cargas quando alimentadas por conversores estáticos e o estudo da influência de diferentes tipos de carga na operação de um conversor. Para possibilitar a realização de estudos suficientemente abrangentes sobre estes aspectos é necessário uma seleção criteriosa dos dispositivos componentes dos módulos de cargas.

Um breve levantamento na literatura didática de Eletrônica de Potência (Rashid, 1988; Dewan, 1975; Wood, 1981; Lander, 1987) mostra que a maior parte das cargas típicas de conversores estáticos pertence a uma das seguintes categorias principais:

- cargas passivas (sem força eletromotriz)
 1. cargas puramente resistivas (e.g.: aquecedores resistivos)
 2. cargas com resistência e indutância (e.g.: aquecedores indutivos)

- cargas ativas (com força eletromotriz)
 1. motores CC
 2. motores CA
 3. cargas eletroquímicas (e.g.: baterias)

Além de prover cargas típicas como as relacionadas acima, os módulos de cargas devem oferecer possibilidade de se variar seus parâmetros com o objetivo de se estudar as correspondentes mudanças de comportamento do conjunto conversor-carga, como por exemplo a passagem do regime de condução contínua para descontínua. Contudo, para evitar uma quantidade excessiva de componentes nos módulos de cargas, optou-se por configurá-los de maneira que o único parâmetro variável seja a indutância. Através da variação apenas da indutância é possível causar importantes mudanças na operação de conversores, fornecendo material suficiente para o cumprimento dos objetivos educacionais deste laboratório. Para este fim são providos diversos módulos de indutância independentes para adicionar em série aos demais módulos de cargas.

Os níveis de tensão de operação dos módulos de carga devem ser compatíveis com os níveis de tensão fornecidos pelos módulos de alimentação, ou seja: 30V. Os níveis de corrente e potência foram escolhidos com o objetivo de dar realismo aos módulos de cargas, para aumentar a motivação das atividades de laboratório. Foi observado que o uso de cargas de muito baixa potência tendem a causar desinteresse nos alunos em atividades de laboratório. Entende-se que isto ocorra porque o aluno

considere um despropósito o emprego de uma tecnologia tão sofisticada e de um equipamento tão volumoso para acionar cargas que parecem brinquedo. Para o aluno, não parece óbvio que um equipamento semelhante ao utilizado no laboratório, com dimensões poucas vezes maiores, possa ser utilizado em níveis de energia infinitamente mais elevados. Isto contribui para que o aluno não valorize devidamente o conteúdo das atividades didáticas desenvolvidas no laboratório. Para melhorar este quadro, considera-se que deve ser aumentado o nível de potência consumido nos módulos de cargas. No entanto, os requisitos de segurança e custo apontam no sentido de baixar estes níveis de potência. Uma solução de compromisso foi conseguida com a escolha do seguinte elenco de cargas:

- resistores 10Ω , 25W
- indutores 10mH, 2A CC
- motores CC 30V, 2A
- motores CA trifásicos 30V, 2A
- baterias 12V, 36Ah

Cada exemplar de um dos itens acima consiste em um módulo independente, montado numa base dotada de bornes de ligação e fusíveis de proteção. Na figura III.2 são mostrados esquematicamente alguns exemplos de módulos de cargas.

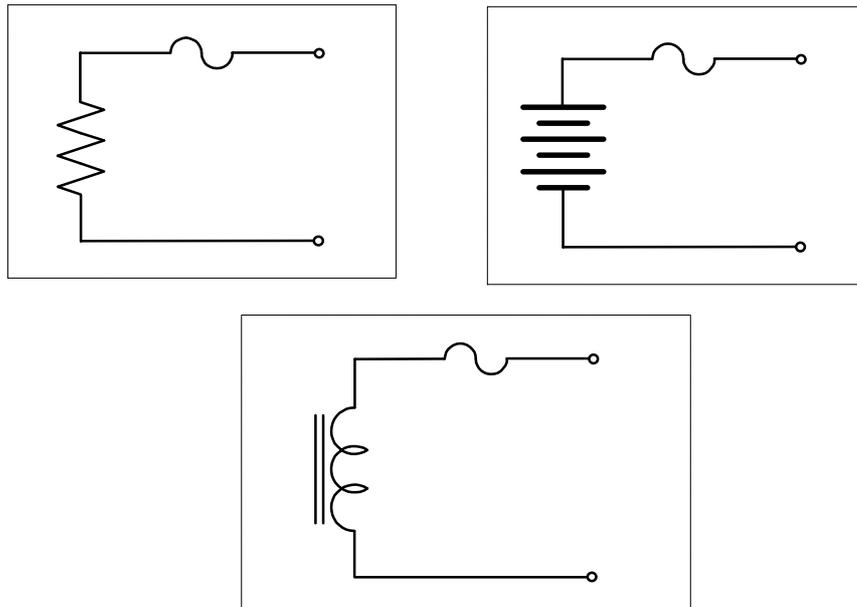


Figura III.2 - Módulos de cargas

Para o estudo de alguns tipos de conversores, deve-se dispor de diodos avulsos para ligação em paralelo com a carga, realizando a função de "free-wheeling". Os módulos de cargas incluem também estes diodos, dotados de terminais apropriados para facilitar a conexão com os outros módulos.

III.4 - MÓDULOS DE CHAVES

No estudo dos princípios básicos de funcionamento de conversores eletrônicos de potência, que é a principal aplicação pretendida para o equipamento apresentado neste trabalho, não é necessário entrar em detalhes a respeito dos requisitos de controle dos dispositivos semicondutores utilizados como chaves. Estes dispositivos, juntamente com seus circuitos de acionamento, podem ser tratados como caixas-pretas sem comprometer o entendimento da operação do conversor no qual eles estão

inseridos, desde que se conheça qualitativamente as condições de comutação em termos de tensões e correntes nos seus terminais.

Inspirado na idéia expressa no parágrafo anterior, um módulo de chave típico foi concebido como um circuito constituído pelo dispositivo semiconductor chaveador de potência e pelos sub-circuitos necessários para seu acionamento, recebendo como entrada de controle um sinal digital. Por razões didáticas, este sinal de controle deve ter uma forma de onda semelhante à função-chaveamento programada para a chave.

Para definir os tipos de dispositivos semicondutores chaveadores de potência necessários nos módulos de chaves foram consideradas as funções de conversão básicas que se deseja implementar neste laboratório. Para cada uma destas funções foi selecionado um dispositivo semiconductor capaz de atender os requisitos de condução de corrente e bloqueio de tensão com um mínimo de circuitos auxiliares. De acordo com o requisito de facilidade de manutenção, proposto no capítulo II, estes dispositivos semicondutores devem ser facilmente obteníveis, de baixo custo e robustos. Na tabela III.1 são mostradas as características requeridas e o dispositivo semiconductor escolhido para cada categoria de funções de conversão.

Com uma breve análise da tabela III.1 conclui-se que são necessários apenas três tipos de módulos de chaves para implementar as funções básicas de conversão. São eles:

- módulos com SCR,
- módulos com transistor bipolar,
- módulos com TRIAC.

função de conversão	requisitos de tensão e corrente	dispositivo selecionado
CA/CC	bloqueio de tensão bidirecional condução de corrente unidirecional	SCR
CC/CC	bloqueio de tensão unidirecional condução de corrente unidirecional	transistor bipolar
CC/CA	bloqueio de tensão unidirecional condução de corrente unidirecional	transistor bipolar
CA/CA	bloqueio de tensão bidirecional condução de corrente bidirecional	TRIAC

Tabela III.1 - seleção de dispositivos semicondutores

A fim de assegurar a robustez dos módulos de chaves, os dispositivos semicondutores de potência são especificados para capacidades de tensão e corrente, em regime contínuo, algumas vezes superiores às correntes nominais requeridas pelas cargas. De um modo geral, como os níveis de tensão e corrente nas cargas foram especificados no entorno de 30V e 2A respectivamente, as chaves semicondutoras são dimensionadas para suportar 100V e 10A continuamente.

O sinal digital de controle das chaves será fornecido pelo computador do módulo de controle. Para facilitar a compatibilização das entradas de controle dos

módulos de chaves com as saídas digitais do computador de controle, serão utilizados níveis lógicos padrão TTL nos sinais de controle. As entradas de controle irão portanto operar com tensões próximas de 0V quando em nível lógico baixo e próximas de 5V quando em nível lógico alto. Estas tensões de controle têm como referência o "terra" lógico do computador de controle. Contudo, os dispositivos semicondutores de potência dos módulos de chaves geralmente necessitam de tensões de controle referenciadas a um de seus terminais de potência. O potencial deste terminal de referência não é conhecido a priori, pois depende da topologia do conversor no qual está inserida a chave. Para que o projeto dos circuitos de controle dos módulos de chaves não dependa da topologia dos conversores nos quais eles serão utilizados, deve haver isolamento galvânica na transmissão do sinal de controle entre a entrada de sinal ligada ao computador de controle e os terminais do dispositivo semicondutor de potência do módulo.

A seguir serão apresentados os projetos dos três tipos de módulos de chaves utilizados: módulos com transistor bipolar, módulos com SCR e módulos com TRIAC. É importante ressaltar que a concepção do equipamento não elimina a possibilidade de utilização de módulos de chaves baseados em outros dispositivos semicondutores. Ao contrário, outros tipos de chaves podem ser facilmente incorporados, bastando para isso a construção de novos módulos de chaves, a exemplo dos que serão mostrados.

(i) Módulos com transistor bipolar

O circuito de acionamento para os módulos de chaves baseados em transistor bipolar é mostrado na figura III.3-(a). Os pontos rotulados T_1 e T_2 são os terminais de potência da chave e T_c é o terminal de controle, conforme simbolizado na figura

III.3-(b). Nesta figura são mostrados também a seta que simboliza o sentido convencional de condução direta de corrente e os sinais de polarização direta de tensão.

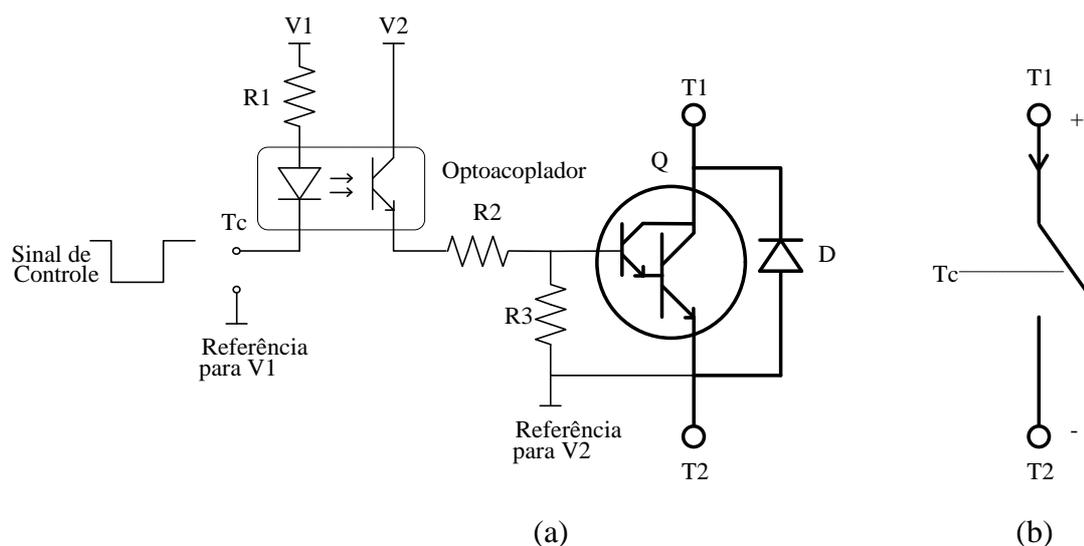


Figura III.3 - Módulo de chave com transistor bipolar

Os pontos rotulados V_1 e V_2 na figura III.3-(a) são nós de ligação de fontes de alimentação de tensão constante. A fonte de alimentação que fornece tensão ao nó V_1 deve ter um valor bem próximo ao nível lógico alto do sinal de controle. O nó de referência desta fonte deve ser conectado ao terminal de referência do sinal de controle. A fonte de alimentação V_2 é eletricamente isolada de V_1 e tem como referência o terminal T_2 . A transmissão do sinal de controle entre a entrada de controle e o circuito de base do transistor principal é feita através de um optoacoplador com transistor na saída. Isto assegura o isolamento galvânico entre os circuitos de potência e o módulo de controle. A operação do circuito de acionamento é descrita nos parágrafos seguintes.

Quando o sinal de controle está em nível lógico alto, a corrente no diodo de entrada do optoacoplador é desprezível, mantendo o transistor de saída do optoacoplador cortado. Conseqüentemente, a corrente na base do transistor principal Q é nula, mantendo-o cortado. Assim, se o potencial de T_1 é mais positivo que o de T_2 , a chave encontra-se em estado de bloqueio ou "aberta".

Para se fazer a chave passar ao estado de condução é necessário que haja uma transição do sinal de controle para nível lógico baixo. Nesta situação, o diodo de entrada do optoacoplador deve ser percorrido por uma corrente de intensidade suficiente para fazer saturar o transistor de saída do optoacoplador. Isto fará com que a tensão de alimentação V_2 seja aplicada sobre o resistor R, injetando corrente na base do transistor principal Q. É importante observar que, para o correto funcionamento deste circuito, a fonte de sinal de controle deve ser capaz de drenar corrente quando sua saída está em nível lógico baixo. Este requisito é satisfeito pelas saídas TTL do módulo de controle.

O resistor R_2 deve ser dimensionado de modo a fazer com que a corrente que entra pela base de Q seja suficiente para saturá-lo. Com isso, se T_1 é positivo em relação a T_2 , a chave entra em condução ou "fecha". Uma nova transição do sinal de controle para nível lógico alto causará a "abertura" da chave. Entretanto, a passagem do estado de condução para o bloqueio pode ser sensivelmente retardada devido ao fenômeno de armazenamento de portadores de carga na junção base-emissor do transistor principal Q. O resistor R_3 reduz este atraso no desligamento, fornecendo um caminho de descarga para as cargas armazenadas

O diodo D conectado em antiparalelo com o transistor principal Q serve para protegê-lo contra polarização reversa. Quando o módulo é utilizado em associação com outras chaves, o diodo D pode atuar como diodo de circulação para correntes de

cargas indutivas (free-wheeling). Como transistor principal do módulo de chave decidiu-se utilizar um transistor do tipo Darlington devido à necessidade de menor corrente de base para acioná-lo.

(ii) Módulos com SCR

O circuito de acionamento para os módulos de chaves baseados em SCR é mostrado na figura III.4-(a). Os pontos rotulados T_1 e T_2 são os terminais de potência da chave e T_c é o terminal de controle, conforme simbolizado na figura III.4-(b). Nesta figura são mostrados também o sentido convencional de condução direta de corrente e os sinais convencionais de polarização direta de tensão.

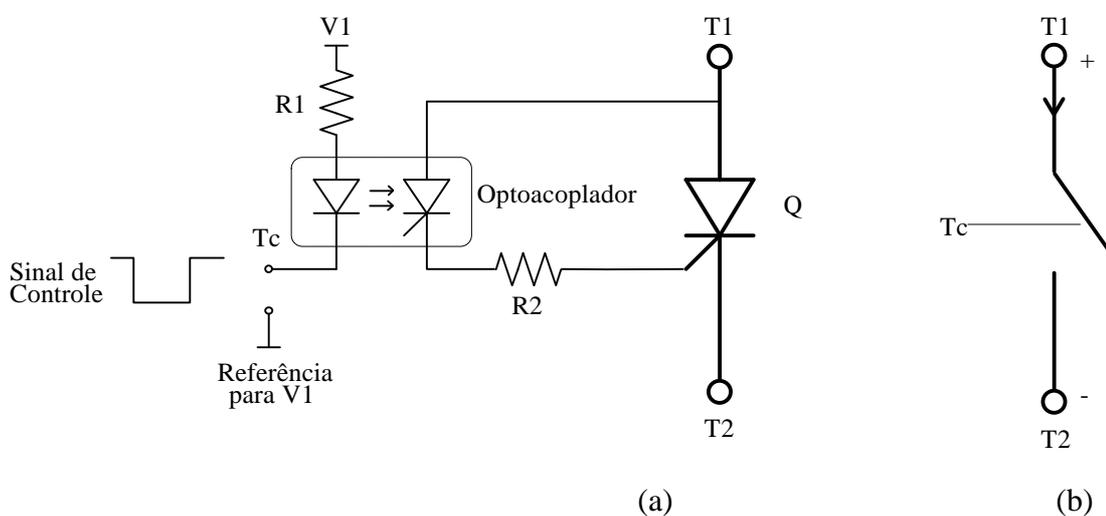


Figura III.4 - Módulo de chave com SCR

A transmissão do sinal de disparo entre a entrada de controle e o "gate" do SCR principal é feita através de um optoacoplador com SCR na saída, assegurando o

isolamento entre os circuitos de controle e de potência. A tensão de alimentação V_1 deve ter um valor aproximadamente igual ao da tensão correspondente ao nível lógico alto do sinal de controle, além de ter a mesma referência. Assim, estando inicialmente o sinal de controle em nível alto, a chave encontra-se em estado de bloqueio.

Quando o sinal de controle sofre uma transição para nível lógico baixo, o diodo de entrada do optoacoplador é percorrido por uma corrente cuja intensidade deve ser suficiente para disparar o SCR de saída do optoacoplador. Feito isto, será injetada uma corrente no "gate" do SCR principal, desde que o mesmo esteja diretamente polarizado. Com valores apropriados do resistor R_2 e da tensão de polarização direta, a chave passará ao estado de condução.

O valor do resistor R_2 tem como limite superior a razão entre a máxima tensão direta que possa ocorrer no instante do disparo e a máxima corrente suportável pelo "gate" do SCR principal. Qualquer que seja o valor de R_2 , haverá sempre um valor mínimo de tensão de polarização direta necessário para assegurar a entrada do SCR principal no estado de condução. Este valor é dado pela soma da maior tensão verificável no "gate" durante o disparo com o produto de R_2 pela mínima corrente de "gate" que garante o disparo (normalmente especificada pelo fabricante).

Após atingir seu valor máximo, a corrente de "gate" decai até zero de maneira aproximadamente linear durante o tempo de ligamento (t_{on}) do SCR principal. Para que a chave se mantenha em estado de condução após o anulamento da corrente de "gate" é necessário que a corrente solicitada pela carga seja superior à corrente de manutenção ($I_{holding}$) do SCR principal.

(iii) Módulos com TRIAC

O circuito de acionamento para os módulos de chaves baseados em TRIAC é mostrado na figura III.5-(a). Os pontos rotulados T_1 e T_2 são os terminais de potência da chave e T_c é o terminal de controle, conforme simbolizado na figura III.5-(b). Nesta figura são mostrados também o sentido convencional de condução direta de corrente e os sinais convencionais de polarização direta de tensão.

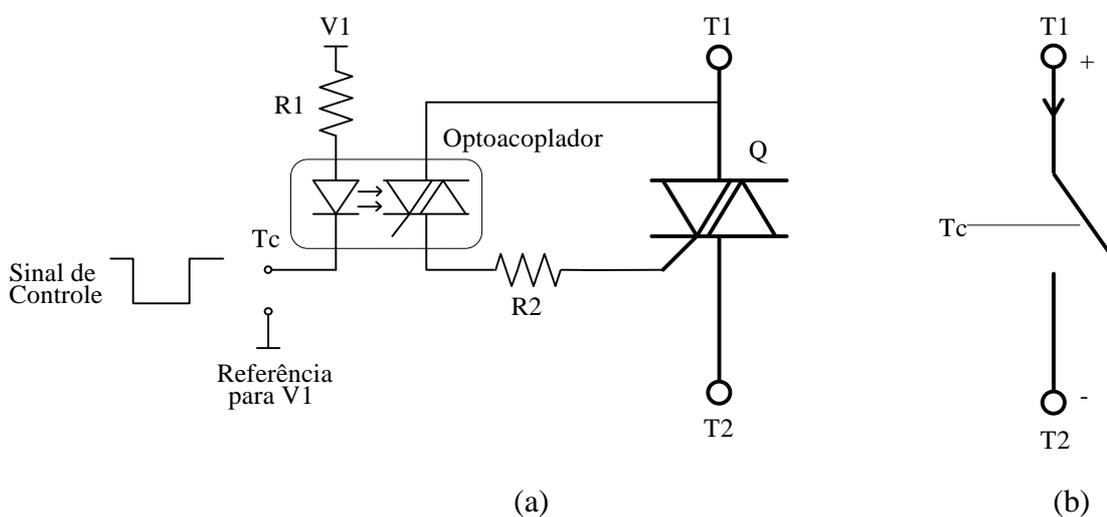


Figura III.5 - Módulo de chave com TRIAC

O isolamento entre o sinal de controle e o "gate" do TRIAC principal é dado por um optoacoplador com TRIAC na saída. A tensão de alimentação V_1 deve ter um valor aproximadamente igual ao da tensão correspondente ao nível lógico alto do sinal de controle, além de ter a mesma referência. Assim, estando inicialmente o sinal de controle em nível alto, a chave encontra-se em estado de bloqueio.

Quando o sinal de controle sofre uma transição para nível lógico baixo, o diodo de entrada do optoacoplador é percorrido por uma corrente cuja intensidade deve ser suficiente para fazer conduzir o TRIAC de saída do optoacoplador. Se o potencial de T_1 é positivo em relação ao de T_2 , a operação do circuito é semelhante à dos módulos com SCR, descrita no item (ii). Ademais, como o TRIAC é um dispositivo bidirecional em corrente e tensão, o estado de condução também é alcançado quando T_1 é negativo em relação a T_2 , sendo que neste caso o disparo do TRIAC principal é feito com corrente de "gate" negativa. Os critérios para escolha do resistor R_2 , bem como os limites operacionais do circuito de disparo, são análogos aos dos módulos com SCR.

III.5 - MÓDULO DE INTERFACES

Segundo Wood (1981), sistemas de controle para conversores estáticos podem ser descritos de forma generalizada conforme o diagrama de blocos mostrado na figura III.6. Neste esquema, há basicamente quatro subdivisões funcionais independentes e intercomunicantes, descritas a seguir.

1. Os "canais" de acionamento das chaves, reponsáveis pela "amplificação" dos sinais lógicos de baixa intensidade e pelo isolamento entre circuitos de controle e potência, fazendo com que sinais de controle de níveis apropriados sejam fornecidos aos dispositivos chaveadores.
2. A seção lógica, que é o "coração" (ou talvez o "cérebro") do controle. Esta função responde a estímulos dos subsistemas descritos nos itens 3 e 4 a seguir, e gera padrões de pulsos, em geral réplicas de baixa intensidade de

funções-chaveamento, que são aplicados aos canais de acionamento das chaves para que o conversor realize a função desejada.

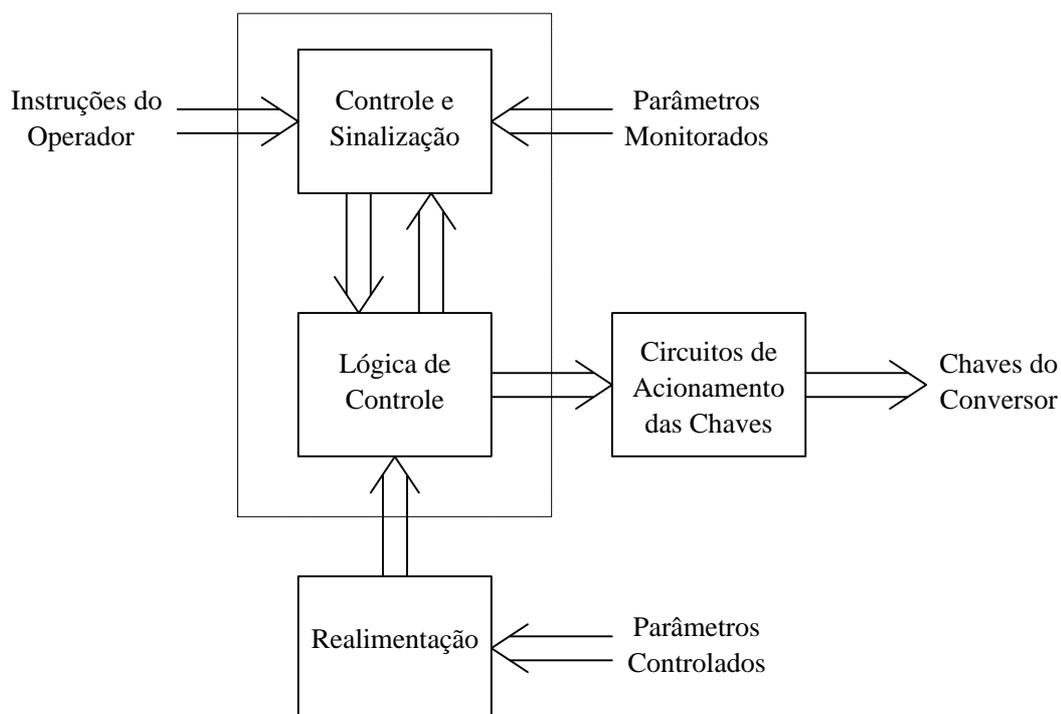


Figura III.6 - Diagrama de blocos de sistemas de controle para conversores estáticos

- malha(s) de realimentação. Até recentemente, as malhas de realimentação eram sempre implementadas com circuitos analógicos. Elas provêm o processamento de sinais através do qual é realizado o controle em malha fechada dos parâmetros do conversor. Além das atribuições normais dos circuitos de realimentação em sistemas lineares, estas malhas devem "traduzir" seus resultados para que a lógica de controle entenda e responda corretamente.

4. A seção de controle e sinalização, que fornece os meios para o conversor comunicar-se com e receber instruções de seus operadores, sejam eles humanos ou máquinas.

De acordo com a concepção apresentada no Capítulo II, toda a seção lógica é implementada no módulo de controle juntamente com a seção de controle e sinalização, sendo suas funções realizadas por software. Isto é simbolizado pela linha tracejada que envolve os blocos que representam estas seções na figura III.6. As setas que cruzam a fronteira da linha tracejada indicam portanto intercâmbios de informações que precisam ocorrer entre as funções implementadas em software e o restante do sistema de controle. Estes intercâmbios são realizados através de operações de entrada e saída de dados do computador pessoal no qual consiste o módulo de controle.

Entre as operações de entrada e saída requeridas pelo módulo de controle, apenas a sinalização e a obtenção de instruções do operador podem ser realizadas pelos dispositivos usuais de entrada e saída de um computador pessoal (basicamente, teclado e vídeo). Os demais intercâmbios necessários ao controle precisam ser realizados através de circuitos de interface dedicados. O propósito do módulo de interfaces é prover tais circuitos, para realização das tarefas de aquisição de dados, temporização, sincronização e transmissão de sinais de comando entre o módulo de controle e os demais módulos do laboratório, integrando as ações das partes do sistema de controle apresentadas na figura III.6.

A seguir são descritas as principais funções do módulo de interfaces e os circuitos responsáveis pela sua execução.

(i) aquisição de dados

Os sinais de realimentação requeridos para o controle em malha fechada de conversores estáticos são freqüentemente de natureza analógica. Por este motivo, o módulo de interfaces é provido de um sub-sistema de aquisição de dados que consiste em um conversor analógico/digital com um amostrador-retentor de ordem zero. Através deste sub-sistema, o módulo de controle digitaliza os sinais de realimentação e processa-os num algoritmo de controle, cuja saída é traduzida em termos de sinais de acionamento para as chaves do conversor. O controle do sub-sistema de aquisição de dados é feito através de portas de entrada e saída do computador do módulo de controle, com os seguintes endereços lógicos:

- SHCTRL: porta de controle do amostrador-retentor.
- ADCTRL: porta de controle do conversor A/D.
- ADMSB e ADLSB: portas de leitura do conversor A/D.

Além de sua função de controle, o sub-sistema de aquisição de dados pode ser usado para fazer leituras de formas de onda de tensões e correntes para pós-processamento (análise harmônica, cálculo de índices de desempenho, etc.). A taxa de amostragem utilizada na aquisição impõe um limite superior ao espectro de freqüências do sinal que pode ser processado sem erros. Embora o teorema da amostragem garanta a possibilidade de reconstrução de um sinal amostrado com o dobro da freqüência de sua maior componente harmônica, na prática são usadas taxas de amostragem mais altas, da ordem de 10 vezes a freqüência da maior harmônica, a fim de facilitar a reconstrução do sinal. No sub-sistema de aquisição de dados implementado, a taxa de amostragem máxima é de 60.000 amostras por segundo. Isto restringe a aquisição de dados a sinais cujas maiores freqüências de interesse são inferiores a 6 kHz.

(ii) temporização

Na operação da seção lógica do sistema de controle de um conversor estático, é necessário um estrito controle de tempo no fornecimento de sinais de comando aos canais de acionamento das chaves. Para realizar este controle, o módulo de interfaces utiliza um relógio/temporizador programável disparável por sinais externos, baseado no circuito integrado INTEL 8253. Na figura III.7 é mostrado um esquema deste dispositivo.

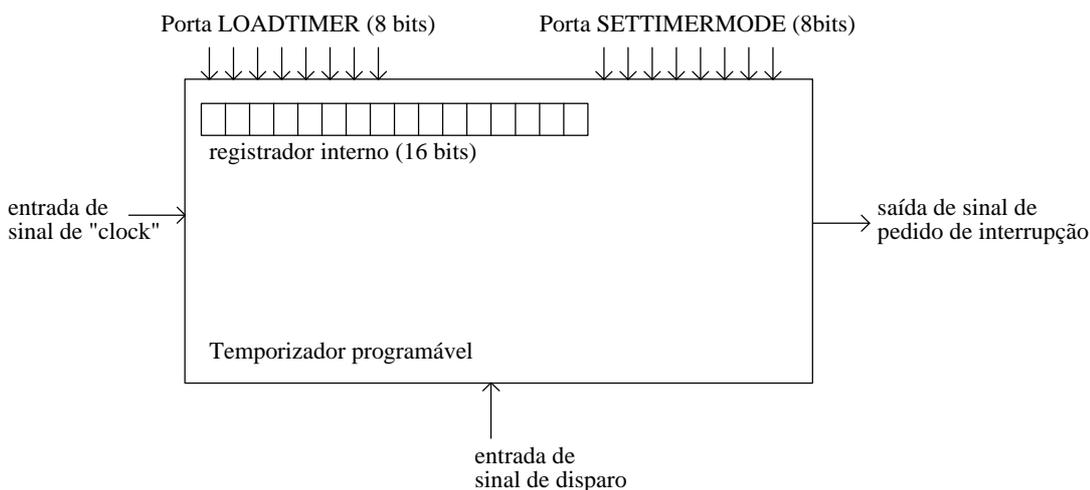


Figura III.7 - Relógio-temporizador programável

O relógio/temporizador possui um registrador interno que deve ser carregado com um número inteiro pelo computador do módulo de controle, através de uma porta de saída cujo endereço lógico é denominado LOADTIMER. O modo de operação do relógio/temporizador é programável através da porta de saída denominada SETTIMERMODE. O dispositivo recebe uma entrada de clock de 2,5

MHz e possui ainda uma entrada de sinal de disparo externo. Sua saída é ligada a uma entrada de pedido de interrupção do computador do módulo de controle.

O relógio-temporizador pode ser programado para operar em um dos seguintes modos:

- **modo sincronizado** (ou de pedido de interrupção com atraso programável): após o registrador interno ser carregado pela porta LOADTIMER, a saída do temporizador permanece em nível lógico alto. Quando ocorre uma transição de nível baixo para nível alto na entrada de sinal de disparo, a saída passa para nível baixo e inicia-se uma contagem regressiva no registrador interno. A duração desta contagem é igual ao valor carregado no registrador vezes o período do clock. Ao final desta contagem, a saída passa para nível alto, efetuando um pedido de interrupção ao computador do módulo de controle. Sempre que o temporizador recebe um sinal de disparo, todo o processo é reiniciado a partir do valor carregado inicialmente no registrador, não sendo necessário recarregá-lo. Este modo de operação é utilizado quando o acionamento das chaves precisa ser sincronizado com eventos externos, como por exemplo em conversores AC/DC ou AC/AC com controle de fase.
- **modo não-sincronizado** (ou interrupção ao final da contagem): assim que o temporizador é programado para operar neste modo, sua saída passa para nível lógico baixo. Quando o registrador interno é carregado, a saída permanece em nível baixo, mas inicia-se uma contagem regressiva imediatamente após o carregamento. Ao final desta contagem, a saída passa para nível lógico alto, efetuando um pedido de interrupção ao

computador do módulo de controle. O tempo decorrido entre o carregamento e o pedido de interrupção é igual ao valor carregado no registrador vezes o período do clock. Para repetir o processo, é necessário carregar novamente o registrador. Este modo de operação é utilizado quando o acionamento das chaves não precisa ser sincronizado com sinais externos.

Em qualquer um dos modos de operação, o valor a ser programado no temporizador deve ser igual à razão entre a temporização desejada e o período do clock que aciona o temporizador. Contudo, o valor programado no temporizador deve ser **sempre diferente de zero**, pois o zero é interpretado como valor máximo de temporização, que é igual a 2^{16} períodos de clock.

(iii) sincronização

Quando as tensões ou correntes nos terminais de um conversor estático são alternadas, o acionamento das chaves precisa comumente ser sincronizado com as ondas de tensão ou de corrente de entrada ou de saída do conversor. Para possibilitar esta sincronização, foi concebido o circuito de sincronismo mostrado na figura III.8.

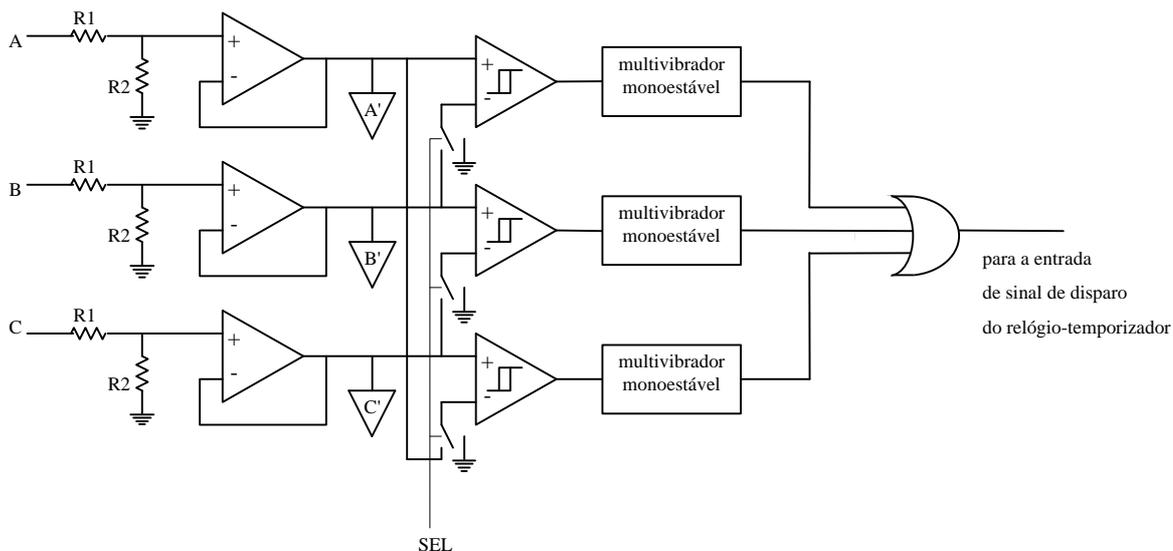


Figura III.8 - Circuito de sincronismo

O circuito de sincronismo da figura III.8 recebe como entradas 3 sinais alternados (A,B,C), que podem ser réplicas de baixa intensidade das tensões ou das correntes nos terminais da matriz-chaveamento. Depois de passar pelos buffers de entrada, os sinais nos pontos A', B' e C' são comparados em 3 "schmitt triggers". Uma chave seletora de 3 polos determina o modo como é feita esta comparação: os sinais podem ser comparados entre si dois a dois ou cada um pode ser comparado com uma referência comum. Isto permite a implementação de dois esquemas diferentes de sincronismo:

- passagem pelo zero: quando todos os sinais são comparados com a referência comum. Permite sincronizar o acionamento das chaves com os instantes nos quais as tensões ou correntes nos terminais de um conversor passam por zero, como é feito por exemplo em retificadores de meia onda.

- cruzamento de fases: quando os sinais são comparados entre si dois a dois. Permite sincronizar o acionamento das chaves com os instantes nos quais as tensões nos terminais de um conversor igualam-se umas às outras, como é feito por exemplo em pontes retificadoras polifásicas.

Na saída dos comparadores aparecem sinais digitais que estão em nível alto se o sinal de entrada é absolutamente positivo ou se é mais positivo do que o sinal da entrada adjacente, dependendo do esquema de comparação selecionado. Cada um destes sinais é injetado na entrada de um multivibrador monoestável que produz um pulso estreito para cada mudança de estado do sinal, de nível baixo para nível alto ou vice-versa. Os pulsos de saída dos multivibradores são somados em uma porta "ou" cuja saída é ligada à entrada de sinal de disparo do relógio-temporizador programável descrito no item (ii).

As saídas dos comparadores do circuito de sincronismo, marcadas com A', B' e C' na figura III.8, podem ser lidas através de uma porta de entrada digital pelo computador do módulo de controle. A leitura desta porta, denominada SINCR, permite determinar a seqüência de fases nos terminais da matriz-chaveamento, uma informação essencial para a perfeita sincronização do acionamento das chaves. A correspondência das saídas A', B' e C' com os bits da porta SINCR é a seguinte:

A' - bit 0

B' - bit 1

C' - bit 2

(iv) transmissão de sinais

A principal função da seção lógica do módulo de controle é o fornecimento de sinais de comando para o acionamento das chaves da matriz-chaveamento. Cada um destes sinais, de natureza binária, possui uma forma de onda semelhante à da função-chaveamento programada para uma das chaves da matriz. Para a transmissão destes sinais, é preciso um canal digital para cada chave da matriz, totalizando nove canais, pois de acordo com a figura II.2 há nove chaves na matriz. Estes canais são providos através de portas de saídas digitais do computador do módulo de controle. Cada canal de transmissão de sinal de acionamento para uma chave corresponde a um bit de uma porta de saída.

As portas de saída do computador do módulo de controle comportam 8 bits. Por isso, os canais de transmissão de sinais de acionamento para as 8 primeiras chaves da matriz-chaveamento são agrupados numa única porta de saída, denominada CHAVES1A8. A última chave recebe seu sinal de acionamento através de um único bit de outra porta de saída, denominada CHAVE9. Os circuitos de saída destas portas são da família lógica TTL e por isso têm a propriedade de absorver corrente em suas saídas quando elas estão em nível lógico baixo. Isto facilita a ligação destas saídas com os terminais de controle dos módulos de chaves, pois estas características de saída atendem às especificações da seção III.3.

III.6 - MÓDULO DE CONTROLE

Conforme mostra a seção III.5, toda a lógica de acionamento, bem como as funções de controle e sinalização do sistema de comando da matriz-chaveamento ficam a cargo do módulo de controle. Este módulo foi concebido como consistindo de um computador pessoal, sendo as funções de sua competência implementadas em software. Com este arranjo pretende-se flexibilizar ao máximo o módulo, no sentido de facilitar a definição e redefinição da lógica de acionamento e também permitir utilizar didaticamente as funções de controle e sinalização. O módulo de controle atua com o suporte do módulo de interfaces, enviando e recebendo sinais dos demais módulos através de portas de entrada e saída. Os endereços destas portas, bem como os valores que são transmitidos por elas, têm sido tratados como símbolos ao longo deste capítulo. Os endereços físicos destas portas, no protótipo implementado, e valores numéricos dos demais símbolos são apresentados no apêndice B.

Para atender às peculiaridades dos vários tipos de conversores estáticos e seus sistemas de controle, foram desenvolvidas diversas unidades de software para o módulo de controle. Cada unidade consiste num programa isolado que se destina ao controle de um determinado tipo de conversor. Numa unidade típica de software de controle, a lógica de acionamento das chaves é implementada por uma ou mais rotinas de serviço de interrupção, acionadas por sinais de pedido de interrupção gerados pelo relógio-temporizador programável do módulo de interfaces.

A forma geral de uma unidade de software típica do módulo de controle pode ser descrita pelo algoritmo mostrado a seguir:

```
PROGRAM UnidadeExemplo;
```

```
.....
```

```
{ declarações de tipos, variáveis, etc. }
```

```
PROCEDURE AcionaChaves; INTERRUPT;
```

```
BEGIN
```

```
.....
```

```
{ rotina de serviço de interrupção para acionamento das  
chaves da matriz-chaveamento. A diretiva INTERRUPT indica  
que esta rotina é acionada por um sinal de pedido de  
interrupção e não pode ser chamada explicitamente. O  
acionamento das chaves é feito através de instruções de  
saída de dados através das portas CHAVES1A8 e CHAVE9. Ao  
término desta rotina, deve ser enviada uma palavra de  
controle ao "chip" controlador de interrupções do  
computador do módulo de controle, sinalizando o final do  
atendimento da interrupção }
```

```
END;
```

```
PROCEDURE Inicializa;
```

```
BEGIN
```

```
.....
```

```
{rotina para inicialização do equipamento, programação do  
modo de operação do temporizador e instalação da rotina  
de serviço de interrupção na tab. de vetores de  
interrupção }
```

```
END;
```

```

PROCEDURE Finaliza;
BEGIN
.....
{ rotina para finalização do programa; deve desabilitar
os pedidos de interrupção, restaurar a tabela de vetores
de interrupção e mandar abrir todas as chaves da matriz }
END;

BEGIN { início do corpo principal do programa }
Inicializa; { chamada da rotina de inicialização }
REPEAT
.....
{ o corpo principal do programa deve realizar as
seguintes funções principais:
- diálogo com o operador, para obtenção de instruções e
parâmetros relativos ao controle do conversor.
- definição da lógica de acionamento das chaves,
- tratamento de erros. }
.....
UNTIL CondiçãoDeFinalização;
Finaliza; { chamada da rotina de finalização }
END. { fim do programa principal }

```

O acionamento das chaves da matriz-chaveamento é feito enviando-se sinais de comando através de portas de saída do módulo de interfaces. As oito primeiras chaves da matriz são acionadas através da porta CHAVES1A8 e a nona chave é acionada através da porta CHAVE9. Esta divisão se deve ao tamanho da palavra que

pode ser enviada pelo barramento de entrada e saída do computador do módulo de controle, que é de 8 bits. Cada chave é controlada por um único bit da respectiva porta, de acordo com o esquema mostrado na tabela III.2.

bit da porta de controle	chave controlada em cada porta	
	CHAVES1A8	CHAVE9
B0	1	9
B1	2	-
B2	3	-
B3	4	-
B4	5	-
B5	6	-
B6	7	-
B7	8	-

Tabela III.2 - controle das chaves da matriz-chaveamento

No projeto das chaves, apresentado na seção III.4, foi especificado que para se colocar uma chave em estado de condução é preciso que sua entrada de controle receba um sinal de controle em nível lógico baixo. Isto corresponde a enviar um bit de valor zero através da porta de controle apropriada. Porém, quando se envia um comando para fechamento de uma chave através da porta CHAVES1A8, deve-se estar atento para não comandar o acionamento de outras chaves inadvertidamente,

uma vez que os demais bits desta porta de controle enviarão sinais para suas respectivas chaves simultaneamente.

A programação do modo de operação do temporizador do módulo de interfaces é feita através da porta SETTIMERMODE. Para fazer o temporizador operar no modo sincronizado, descrito na seção III.5, é preciso enviar o código de controle SINC pela porta SETTIMERMODE. Para operação em modo não-sincronizado, deve-se enviar o código NOSINC. A programação do modo de operação deve ser feita antes de qualquer outro acesso ao temporizador. O valor de contagem a ser carregado no registrador interno do temporizador, deve ser um número inteiro de 16 bits. Como a porta de saída para o registrador é de 8 bits, o carregamento da contagem deve ser feito em duas etapas: primeiro envia-se os 8 bits menos significativos (parte baixa) e depois os 8 bits mais significativos (parte alta), através de dois acessos consecutivos à porta LOADTIMER.

Quando o temporizador é programado para operar no modo não sincronizado, ele solicita uma interrupção ao final da contagem do valor carregado previamente em seu registrador interno. A própria rotina que atende a interrupção deve recarregar o temporizador para garantir a solicitação de uma nova interrupção, estabelecendo um processo cíclico. Entretanto, o primeiro carregamento ou o recarregamento após uma suspensão temporária do ciclo de interrupções, deve ser feita explicitamente no módulo principal do programa de controle. Para isso, basta carregar o temporizador com o valor 0, que produz a temporização máxima (cerca de 26 ms), ao fim da qual será solicitada a primeira interrupção, que dará início ao ciclo.

No capítulo IV, serão mostrados detalhadamente alguns exemplos de algoritmos de controle para diferentes tipos de conversores. É importante ressaltar que as unidades de software de controle desenvolvidas não esgotam o potencial do

equipamento. Outras técnicas de controle podem ser facilmente implementadas, bastando para isso escrever o programa de controle apropriado. Poucas restrições se impõem quanto à linguagem a ser utilizada, desde que a mesma ofereça meios de se acessar portas de entrada e saída e instalar rotinas de serviço de interrupção. Pode-se até mesmo utilizar o desenvolvimento de programas de controle como atividade didática no estudo do controle de conversores. Contudo, no desenvolvimento de um programa de controle, deve ser dada muita atenção à seção lógica, a fim de evitar situações patológicas no acionamento das chaves. Na depuração de um programa de controle, deve-se certificar da não-ocorrência das seguintes situações:

- fechamento simultâneo de chaves que estejam conectadas a diferentes terminais de alimentação mas a um mesmo terminal da carga (curto-circuito na fonte). Contudo, caso o circuito de alimentação se comporte dinamicamente como fonte de corrente, esta situação é permitida e até mesmo necessária para uma boa comutação.
- caso o acionamento das chaves seja sincronizado com um sinal externo, cuidar para que o atraso programado no temporizador do módulo de interfaces, para a geração de um sinal de pedido de interrupção a partir de um pulso de sincronismo, não seja maior que o tempo previsto para a ocorrência de um novo pulso de sincronismo, ou não será solicitada a referida interrupção.

III.7 - ARRANJO FÍSICO DOS MÓDULOS

Para se interligar os módulos do laboratório de uma forma facilitada, foi concebida uma base de montagem dotada das seguintes facilidades:

- bornes para ligação dos módulos de fontes e de cargas, e terminais de potência dos módulos de chaves,
- conectores para alimentação e fornecimento de sinais de controle aos módulos de chaves,
- barramentos de potência, para transferência de energia entre os módulos de fontes e de cargas,
- barramento de controle, para transmissão de sinais de controle e alimentação dos circuitos auxiliares dos módulos de cargas,
- fontes de alimentação isoladas para os circuitos auxiliares dos módulos de chaves.

De acordo com a especificação da seção II.2, o arranjo dos módulos do equipamento deve expressar visualmente a idéia da matriz-chaveamento. Por isso, a base de montagem foi projetada de modo a reproduzir com a maior fidelidade possível o diagrama esquemático da matriz de chaves, mostrado na figura II.2. Na figura III.9 é mostrada uma vista superior da base de montagem.

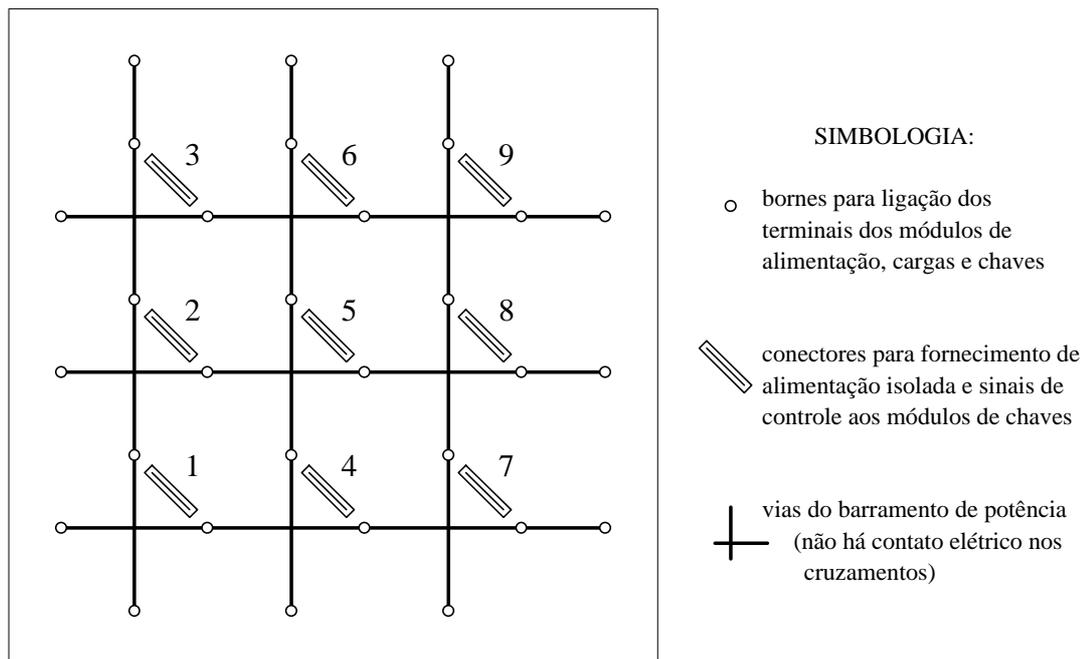


Figura III.9 - Vista superior da base de montagem

Os conectores para fornecimento de alimentação isolada e sinais de controle aos módulos de chaves são interligados através de um barramento de controle, não mostrado na figura III.9. A pinagem destes conectores é mostrada na figura III.10.

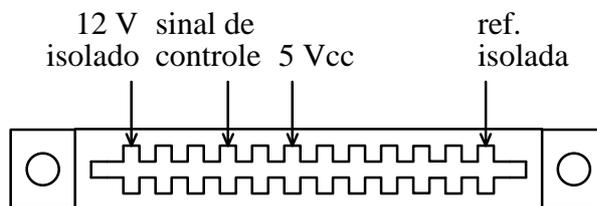


Figura III.10 - Pinagem do conector de alimentação e controle

De acordo com o projeto dos módulos de chaves, mostrado na seção III.4, são necessários dois tipos de alimentação para seus circuitos de acionamento:

- alimentação TTL, para a seção de entrada dos optoacopladores dos circuitos de acionamento, com a mesma referência que a fonte do sinal de controle.
- alimentação isolada, ou seja, com referência flutuante, para os circuitos de base dos módulos de chaves com transistores.

A alimentação TTL é fornecida por uma fonte de tensão de 5V, cujo terminal de referência é ligado ao terra do computador do módulo de controle, que é de onde provêm os sinais de controle. A alimentação isolada é fornecida por um circuito composto de um inversor de onda quadrada, operando a 20kHz, e nove transformadores de isolamento. Cada transformador é responsável pelo suprimento de tensão isolada a um dos conectores da base de montagem. Convém observar que esta alimentação isolada é alternada, devendo portanto ser retificada localmente nos módulos de chaves antes de ser utilizada. Os módulos de chaves são montados em placas de circuito impresso com conector tipo pente em uma das bordas. Os terminais de potência destes módulos são compostos de cabos flexíveis com plugues tipo banana nas extremidades. São usadas cores diferentes nos plugues para indicar o sentido convencional de polarização direta da chave, conforme convencionado na seção III.4. O plugue de cor vermelha, segundo aquela convenção, é positivo em relação ao plugue de cor preta. Na figura III.11 são mostrados esquematicamente estes detalhes.

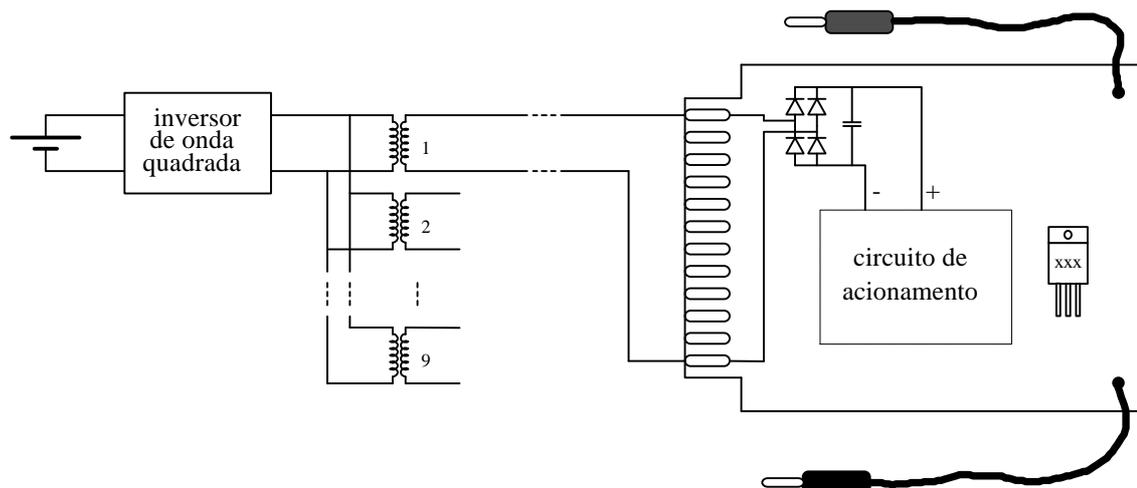


Figura III.11 - Detalhe do sistema de alimentação dos módulos de chaves

No protótipo construído, os circuitos que compõem o módulo de interfaces, com exceção do circuito de sincronismo, são montados em uma placa que fica no interior do computador do módulo de controle. Nesta placa, a saída de sinal de pedido de interrupção do circuito de temporização é permanentemente ligada a um dos terminais de pedido de interrupção do barramento do computador do módulo de controle. As demais ligações são feitas através de conectores, cuja pinagem é mostrada na referência Taurus (1987). O circuito de sincronismo é montado em uma placa separada, que fica junto à base de montagem.

III.8 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o projeto dos módulos do laboratório didático de Eletrônica de Potência, em concordância com as especificações do capítulo II.

Neste projeto, procurou-se simplificar ao máximo os circuitos auxiliares, de modo a cumprir os requisitos de robustez e facilidade de manutenção.

O software de controle foi descrito através de um algoritmo generalizado, sem detalhar os procedimentos para o acionamento das chaves e para o controle dos parâmetros operativos. Este detalhamento será apresentado no capítulo IV, juntamente com dados experimentais sobre a operação do equipamento.

CAPÍTULO IV - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

IV.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são mostrados exemplos de utilização do equipamento desenvolvido, a título de validação experimental do projeto apresentado no capítulo III. Nestes exemplos, são detalhados os procedimentos do software de controle relativos ao acionamento das chaves e controle de parâmetros do conversor. São também apontadas algumas limitações do equipamento e avaliados possíveis meios de superá-las. Ao final do capítulo, são relacionadas outras aplicações já testadas no equipamento.

Os exemplos a serem apresentados consistem na implementação dos seguintes conversores:

- retificador de onda completa monofásico controlado,
- "chopper" de quatro quadrantes.

Devido ao fato de o equipamento desenvolvido neste trabalho destinar-se a fins educacionais, há dois aspectos principais na validação do mesmo. Primeiro, há o aspecto técnico, ou seja, a capacidade de desempenhar corretamente as funções planejadas. Em segundo lugar, há o aspecto didático, relacionado à interação do aluno com o equipamento. Os testes de validação apresentados neste capítulo referem-se somente ao aspecto técnico. Considera-se que a avaliação dos aspectos didáticos esteja além do escopo deste trabalho e caberia a uma pesquisa na área pedagógica. No entanto, os exemplos escolhidos foram selecionados, com base na experiência didática em Eletrônica de Potência na UFRJ, como os mais adequados.

IV.2 - EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO

A seguir são apresentados os procedimentos e os resultados dos testes de validação do equipamento, na forma de exemplos de utilização.

IV.2.1 - Retificador de onda completa monofásico controlado

A topologia usualmente utilizada para realizar esta função de conversão é mostrada na figura IV.1. Pode-se notar que as chaves semicondutoras usadas neste circuito são implementadas com tiristores.

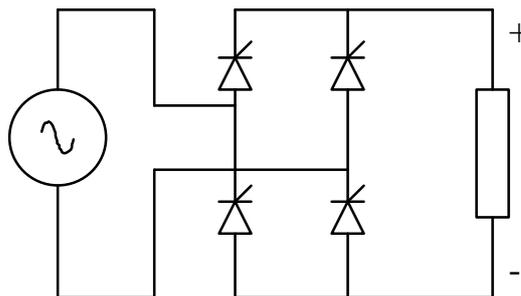


Figura IV.1 - retificador de onda completa monofásico controlado

A técnica mais comumente utilizada para o controle do retificador é o chamado controle de fase, no qual cada chave do conversor entra em condução com um atraso regulável, a contar do instante em que a mesma torna-se diretamente polarizada. A este atraso corresponde um ângulo em um ciclo da tensão de alimentação, chamado ângulo de disparo, e que deve ser igual para todas as chaves. Neste tipo de retificador, cada uma das chaves sai do estado de condução somente quando a corrente que passa por ela cai a zero (comutação natural). O circuito mostrado na figura IV.1 pode ser redesenhado na forma de matriz-chaveamento, como mostrado na figura IV.2.

A representação esquemática mostrada na figura IV.2 indica como devem ser colocados os módulos de chaves tiristorizadas na base de montagem. Na colocação dos módulos de chaves, deve-se estar atento para a ligação dos terminais de potência com a polaridade correta. A montagem do conversor é completada com a ligação do circuito de sincronismo, operando no modo de comparação com a referência. As formas de onda dos sinais de entrada e de saída do circuito de sincronismo, medidas com um osciloscópio digital, são mostradas na figura IV.3.

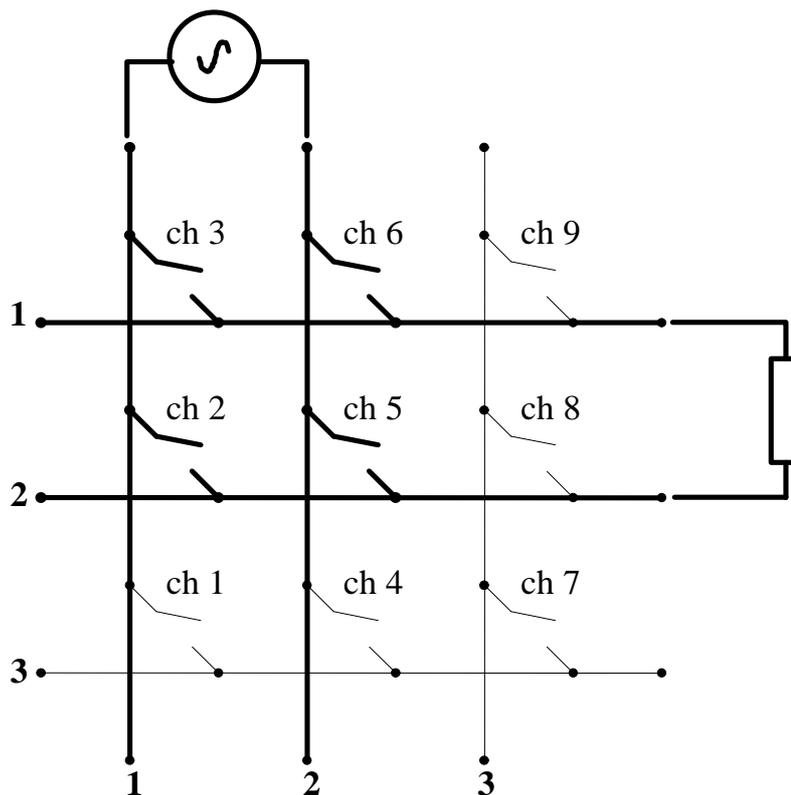


Figura IV.2 - Matriz-chaveamento para o retificador de onda completa monofásico

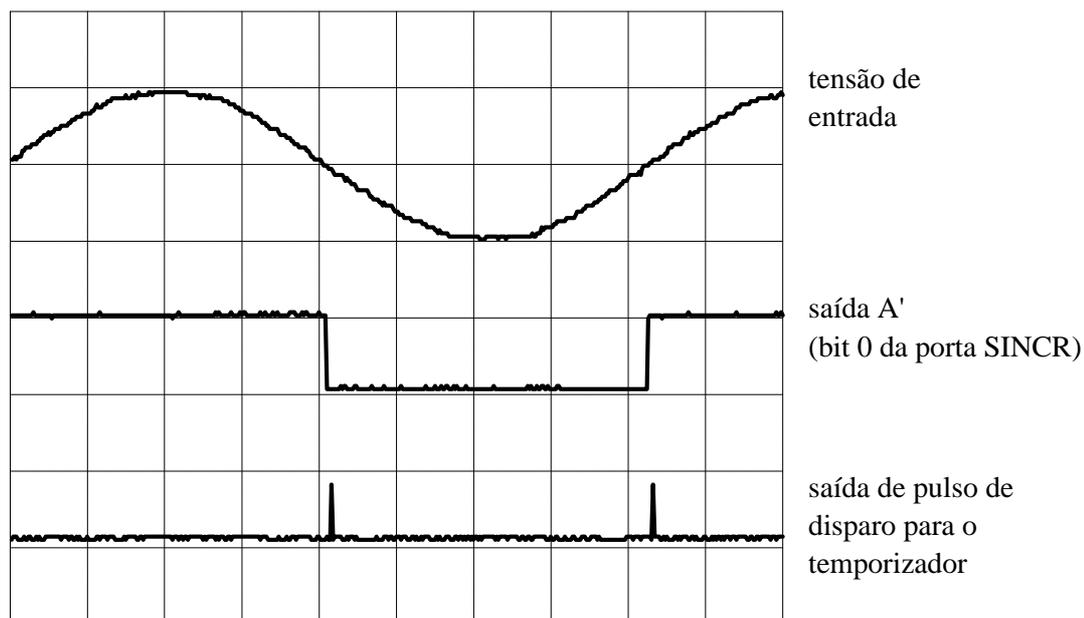
O temporizador do módulo de interfaces deve ser programado para operar no modo sincronizado, e seu registrador interno deve ser carregado com um valor inteiro. O valor a ser carregado no registrador deve ser proporcional ao ângulo de disparo desejado para o retificador. Se o valor do ângulo de disparo (α°) é dado em graus, o valor a ser carregado no registrador é obtido a partir da seguinte expressão:

$$n = (\alpha^\circ/360^\circ) \cdot f_{\text{clock}} / f_{\text{rede}} \quad (\text{IV.1})$$

onde:

f_{clock} = frequência do "clock" do temporizador em hertz

f_{rede} = frequência da rede de alimentação em hertz



eixo x: 5 V/div
eixo y: 2 ms/div

Figura IV.3 - Sinais de entrada e saída do circuito de sincronismo

A seguir, é feita uma descrição pormenorizada do software de controle.

a) Procedimento de inicialização:

- Programar o temporizador para operar em modo sincronizado, enviando o comando SINC pela porta SETTIMERMODE.
- Instalar o procedimento de acionamento das chaves como rotina de serviço de interrupção na tabela de vetores de interrupção, salvando o conteúdo original do vetor utilizado. Isto deve ser pedido através de uma chamada de rotina de serviço do sistema operacional do computador de controle.
- Comandar a abertura de todas as chaves, enviando palavras de controle nas quais todos os bits têm valor lógico 1, através das portas de acionamento das chaves (CHAVES1A8 e CHAVE9).

b) Procedimento de acionamento das chaves:

Este procedimento só é ativado, após sua instalação pelo procedimento de inicialização, quando o computador do módulo de controle recebe um sinal de pedido de interrupção proveniente do temporizador do módulo de interfaces, desde que o computador esteja habilitado para aceitar pedidos de interrupção.

- Testar o bit 0 da porta SINCR, correspondente à saída A' do circuito de sincronismo (assumindo-se que foi utilizada a entrada A do mesmo) para determinar se a tensão de alimentação do conversor é instantaneamente positiva ou negativa.
- Se o bit A' está em nível alto (tensão de alimentação positiva), então comandar o fechamento das chaves 2 e 6, enviando a palavra de controle 11011101 em binário ou DD em hexadecimal, através da porta CHAVES1A8.
- Se o bit A' está em nível baixo (tensão de alimentação negativa), então comandar o fechamento das chaves 3 e 5, enviando a palavra de controle 11101011 em binário ou EB em hexadecimal, através da porta CHAVES1A8.
- Enviar sinal de fim de interrupção para o controlador de interrupções do computador do módulo de controle.

c) Procedimento de finalização:

- Desabilitar o atendimento de interrupções solicitadas pelo módulo de interfaces.

- Enviar comando para abertura de todas as chaves, da mesma maneira que no procedimento de inicialização.
- Restaurar o conteúdo original do vetor de interrupção utilizado para a instalação do procedimento de acionamento das chaves.
- Encerrar a execução do programa.

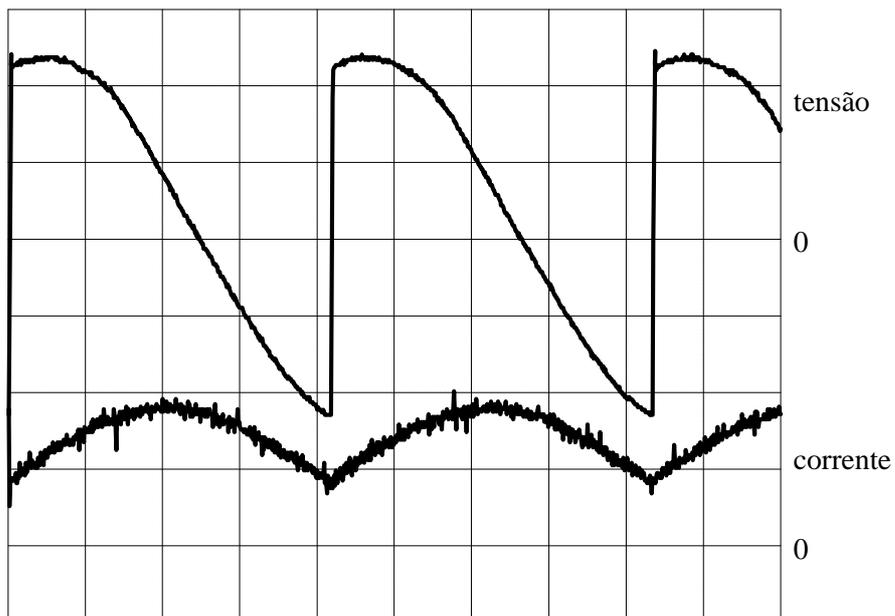
d) Programa principal:

- Executar o procedimento de inicialização.
- Executar repetidamente o seguinte ciclo de diálogo com o operador:
 - apresentar menu com as seguintes opções para controle da operação do conversor:
 1. (Re)definir ângulo de disparo
 2. (Re)iniciar o acionamento das chaves
 3. Interromper o acionamento das chaves
 4. Encerrar o programa
 - obter a opção escolhida pelo operador.
 - de acordo com a opção escolhida, executar as instruções seguintes:
 - 1: Obter do usuário um valor entre 0° e 180° para o ângulo de disparo. A partir do ângulo obtido, calcular o valor a ser programado no temporizador a fim de produzir o atraso correspondente. Em seguida, carregar o temporizador com o valor calculado, através da porta LOADTIMER.

- 2: Se ainda não foi definido nenhum valor para o ângulo de disparo, executar as instruções da opção 1. Em seguida, habilitar o atendimento de interrupções solicitadas pelo temporizador do módulo de interfaces, que ativarão o procedimento de acionamento das chaves.
- 3: Desabilitar o atendimento de interrupções solicitadas pelo temporizador do módulo de interfaces.
- 4: Executar o procedimento de finalização.

No apêndice B é apresentada uma listagem do software de controle utilizado neste exemplo.

Posto em execução o programa, as formas de onda de tensão e corrente de saída, medidas em uma carga RL, são mostradas na figura IV.4. Foi utilizado um ângulo de disparo de 70° , que fez com que o conversor operasse em regime de condução contínua.



eixo x: 2 ms/div
eixo y (tensão): 20 V/div
eixo y (corrente): 0.2 A/div

Figura IV.4 - Tensão e corrente em carga RL operando em regime de condução contínua, com ângulo de disparo igual a 70° .

Reduzindo-se a indutância da carga, o conversor passa a operar no regime de condução descontínua, como mostrado na figura IV.5

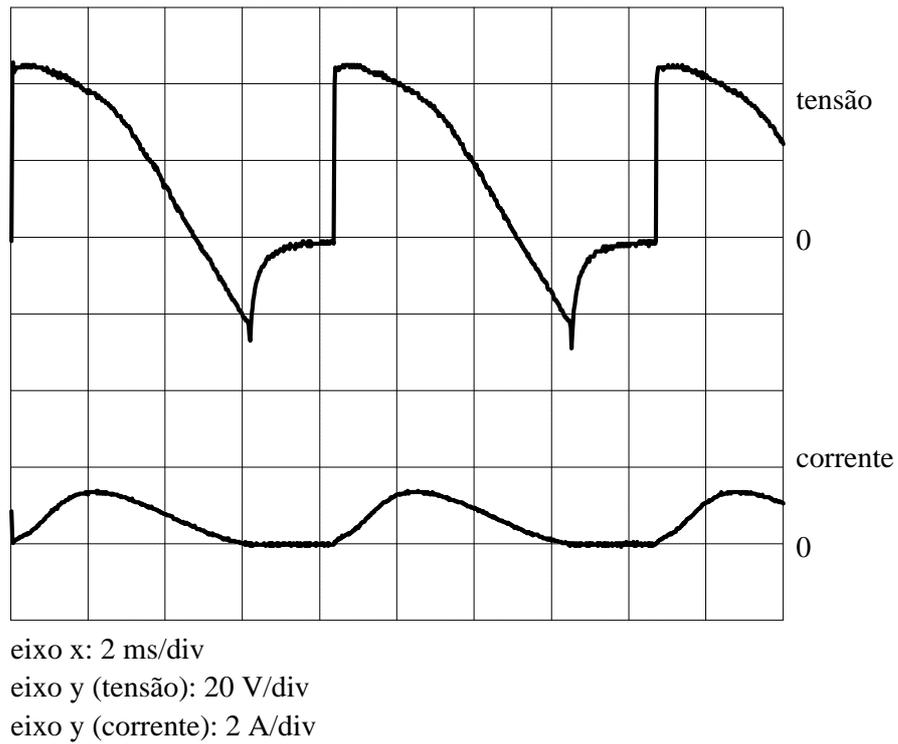


Figura IV.5 - Tensão e corrente em carga RL operando em regime de condução descontínua, com ângulo de disparo igual a 70° .

Uma posterior redução no ângulo de disparo para 10° faz o conversor voltar a operar no regime de condução contínua, como mostrado na figura IV.6.

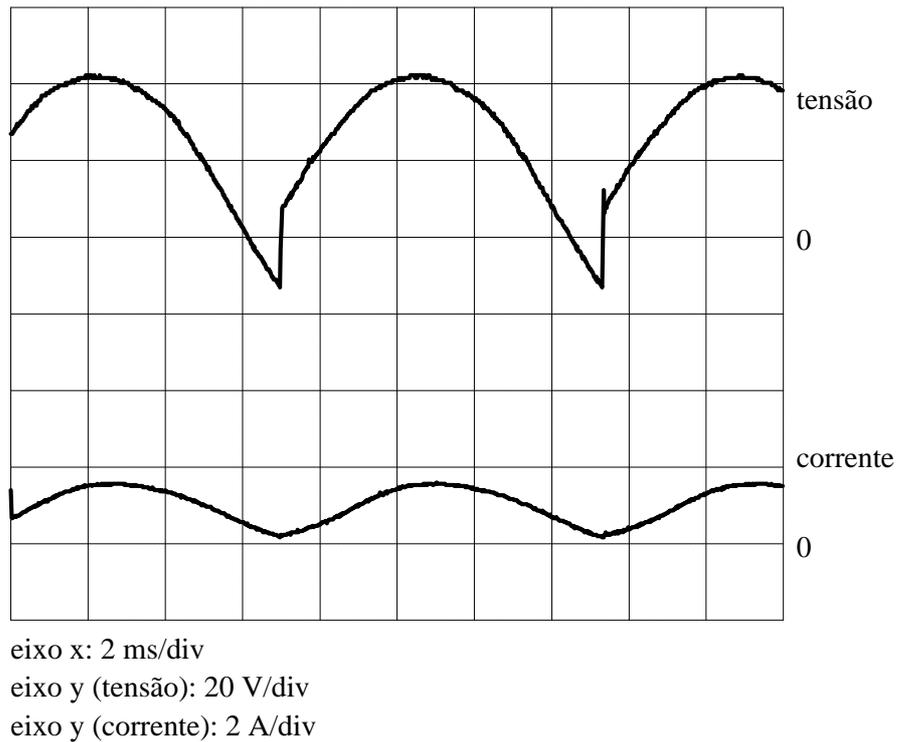


Figura IV.6 - Tensão e corrente em carga RL operando em regime de condução contínua, com ângulo de disparo igual a 10° .

IV.2.2 - "Chopper" de quatro quadrantes

A topologia usualmente utilizada para realizar esta função de conversão é mostrada na figura IV.7, juntamente com uma representação do plano $V \times I$, onde são identificados os quatro quadrantes de operação. Pode-se notar que as chaves semicondutoras usadas neste circuito são implementadas com transistores.

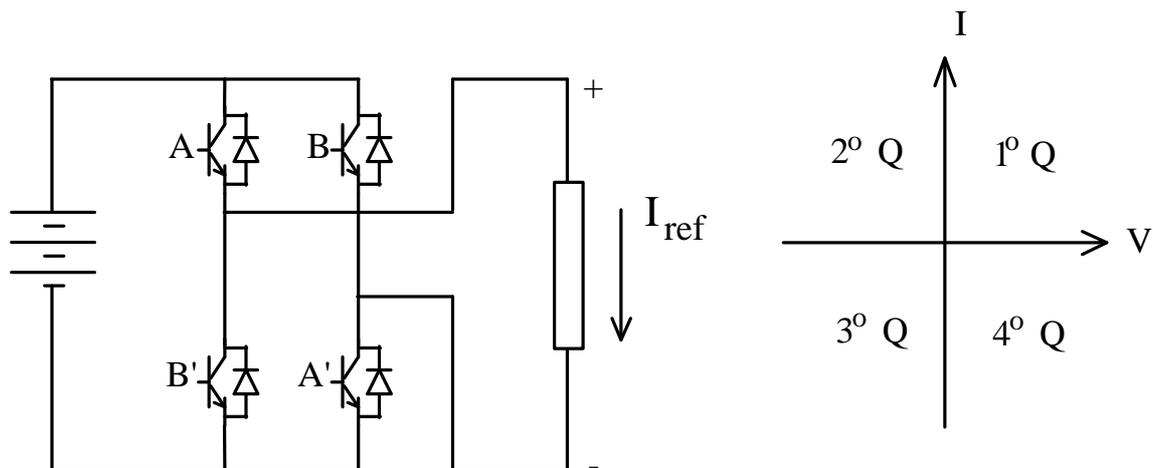


Figura IV.7 - "Chopper" de quatro quadrantes

O controle do "chopper" de quatro quadrantes é feito da seguinte maneira:

- Para operação no primeiro quadrante do plano V-I, são acionadas apenas as chaves A e A'. A chave A' fica permanentemente fechada e a chave A fica fechando e abrindo ciclicamente. Quando a chave A está fechada, a tensão total da fonte de alimentação é aplicada diretamente sobre a carga. Quando a chave A está aberta, a tensão sobre a carga é nula enquanto houver continuidade de corrente na mesma. Em regime permanente, a corrente da carga flui no sentido indicado pela seta mostrada na figura IV.7. Se a carga é indutiva, o diodo ligado em antiparalelo com a chave B' assegura a continuidade da corrente na carga quando é aberta a chave A, fazendo papel de "free-wheeling".
- Para operação no terceiro quadrante do plano V-I, são acionadas apenas as chaves B e B'. A chave B' fica permanentemente fechada e a chave B fica fechando e abrindo ciclicamente. Quando a chave B está fechada, a tensão

total da fonte de alimentação é aplicada sobre a carga, porém com polaridade invertida. Quando a chave B está aberta, a tensão sobre a carga é nula. Em regime permanente, a corrente da carga flui no sentido oposto ao indicado pela seta mostrada na figura IV.7. Desta vez, quem faz o papel de "free-wheeling" é o diodo ligado em antiparalelo com a chave A'.

- A operação no segundo ou no quarto quadrantes ocorre apenas transitoriamente. Para cargas passivas, esta operação não pode ser sustentada indefinidamente porque está associada a uma transferência de energia da carga para a fonte (o produto $V_x I$ é negativo). Para se fazer o conversor operar momentaneamente no segundo quadrante, é preciso que a corrente na carga esteja fluindo no sentido indicado pela seta da figura IV.7. Deve-se então acionar a chave A', fechando-a e abrindo-a alternadamente, sem acionar as demais chaves. Quando a chave A' estiver fechada, a corrente da carga circulará por ela e pelo diodo associado à chave B', fazendo com que a tensão sobre a carga seja nula. Quando a chave A' estiver aberta, a corrente da carga circulará pelos diodos das chaves B e B', fazendo com que a tensão de alimentação seja aplicada sobre a carga com polaridade invertida. Enquanto a corrente da carga continuar fluindo no sentido positivo, o valor médio da tensão de saída será negativo, configurando a operação no segundo quadrante.
- Para se fazer o conversor operar momentaneamente no quarto quadrante, é preciso que a corrente na carga esteja fluindo no sentido oposto ao indicado pela seta da figura IV.7. Deve-se então acionar a chave B', fechando-a e abrindo-a alternadamente, sem acionar as demais chaves. Quando a chave B' estiver fechada, a corrente da carga circulará por ela e pelo diodo associado à chave A', fazendo com que a tensão sobre a carga seja nula. Quando a chave B' estiver aberta, a corrente da carga circulará pelos diodos das chaves A e A',

fazendo com que a tensão de alimentação seja aplicada diretamente sobre a carga. Enquanto a corrente da carga continuar fluindo no sentido negativo, o valor médio da tensão de saída será positivo, configurando a operação no quarto quadrante.

Quando o "chopper" opera no primeiro quadrante, o controle do nível médio da tensão de saída é obtido através da variação do tempo que a chave A fica fechada ou aberta. Seja T_{on} o tempo que a chave fica fechada e T_{off} o tempo que a chave fica aberta. A soma de T_{on} com T_{off} define um ciclo da operação do "chopper", e é igual ao período T da forma de onda da tensão de saída, ou seja:

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (IV.2)$$

Quando a chave A está fechada, a tensão plena da fonte é aplicada sobre a carga; quando a chave A está aberta, a tensão sobre a carga é nula (supondo-se que não ocorre anulamento da corrente na carga). Assim, o valor médio da tensão de saída é proporcional à razão T_{on} / T , que expressa em porcentagem é denominada ciclo de trabalho do "chopper". A forma mais usual de se controlar a tensão de saída é variar o ciclo de trabalho, mantendo-se fixo o período T . Quando o "chopper" opera no terceiro quadrante, o controle da tensão de saída é feito de modo semelhante, utilizando-se porém a chave B. A chave utilizada para controlar a tensão de saída será chamada chave de controle, sendo A para operação no primeiro quadrante, A' para operação no segundo, B para operação no terceiro e B' para operação no quarto quadrante.

Rearranjando-se o circuito da figura IV.7 na forma da matriz-chaveamento, tem-se o esquema mostrado na figura IV.8.

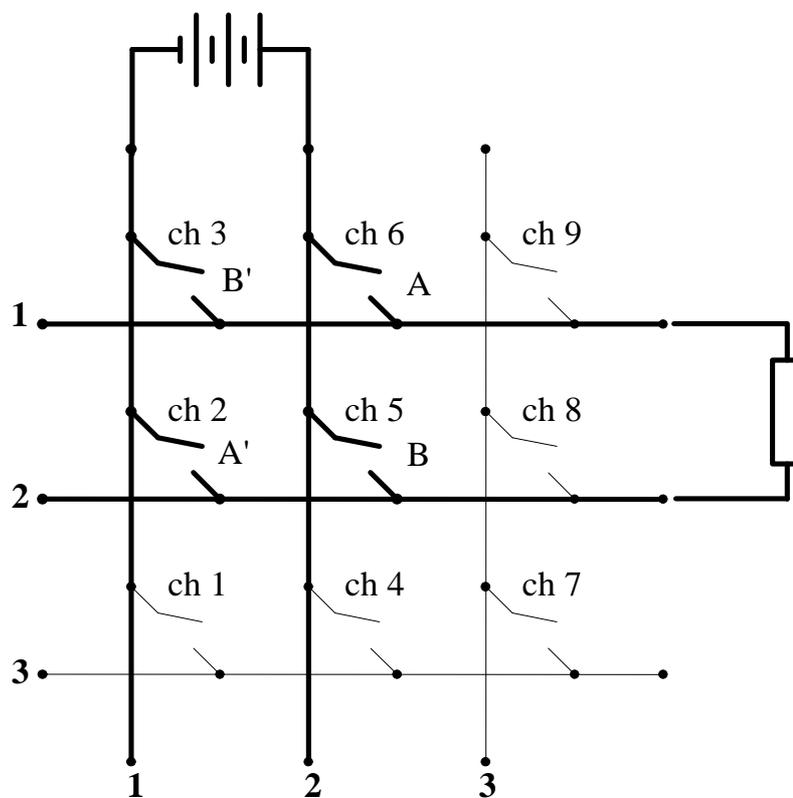


Figura IV.8 - Matriz-chaveamento para o "chopper" de quatro quadrantes

A representação esquemática mostrada na figura IV.8 indica como devem ser colocados os módulos de chaves transistorizadas na base de montagem. Na colocação dos módulos de chaves, deve-se estar atento para a ligação dos terminais de potência com a polaridade correta.

Na montagem do "chopper", não é necessário utilizar o circuito de sincronismo do módulo de interfaces, uma vez que o acionamento das chaves não precisa ser sincronizado com nenhum evento externo. Conseqüentemente, o temporizador do módulo de interfaces deve ser programado para operar no modo não-sincronizado.

A seguir é feita uma descrição pormenorizada do software de controle.

a) Procedimento de inicialização:

- Programar o temporizador para operar em modo não-sincronizado, enviando o comando NOSINC pela porta SETTIMERMODE.
- Instalar o procedimento de acionamento das chaves como rotina de serviço de interrupção na tabela de vetores de interrupção e salvar o conteúdo original do vetor utilizado. Isto deve ser feito através de uma chamada de rotina de serviço do sistema operacional do computador do módulo de controle.
- Comandar a abertura de todas as chaves, enviando palavras de controle de valor 11111111 em binário ou FF em hexadecimal , através das portas de acionamento das chaves (CHAVES1A8 e CHAVE9).

b) Procedimento de acionamento das chaves:

Este procedimento só é ativado, após sua instalação pelo procedimento de inicialização, quando o computador do módulo de controle recebe um sinal de pedido de interrupção proveniente do temporizador do módulo de interfaces, desde que o computador esteja habilitado para aceitar pedidos de interrupção.

O funcionamento deste procedimento baseia-se em informações gerenciadas pelo programa principal e armazenadas nas seguintes variáveis globais:

- TENSAO_SAIDA, uma variável de um tipo enumerado que pode assumir os valores PLENA e NULA, e representa a intensidade da

tensão de saída do conversor imediatamente antes da ativação deste procedimento.

- CONFIG_CHAVES, um vetor de dois elementos de tipo byte, cujo índices podem assumir os valores PLENA ou NULA. No elemento CONFIG_CHAVES[PLENA], o programa principal armazena a palavra de controle que deve ser enviada pela porta CHAVES1A8 para modificar a configuração das chaves do conversor a fim de que seja aplicada tensão plena sobre a carga. No elemento CONFIG_CHAVES[NULA], o programa principal armazena a palavra de controle que deve ser enviada pela porta CHAVES1A8 para modificar a configuração das chaves do conversor a fim de que seja aplicada tensão nula sobre a carga. Ambas as palavras de controle variam conforme o quadrante em que o conversor está operando, sob a ação do programa principal.
- VALOR_TON, uma variável de tipo inteiro (2 bytes) cujo conteúdo será carregado no temporizador imediatamente após o fechamento da chave de controle, a fim de produzir uma temporização igual a T_{on} até o próximo pedido de interrupção.
- VALOR_TOFF, uma variável de tipo inteiro (2 bytes) cujo conteúdo será carregado no temporizador imediatamente após a abertura da chave de controle, a fim de produzir uma temporização igual a T_{off} até o próximo pedido de interrupção.

A operação do procedimento de acionamento das chaves é descrita a seguir.

- Se o conteúdo da variável de controle TENSAO_SAIDA é PLENA, então:

- modificar o estado das chaves do conversor a fim de aplicar tensão nula sobre a carga, enviando a palavra de controle armazenada em CONFIG_CHAVES[NULA] pela porta CHAVES1A8.
 - iniciar a contagem do tempo T_{off} , programando o temporizador com VALOR_TOFF pela porta LOADTIMER.
 - carregar o valor NULA na variável de controle TENSAO_SAIDA.
- Caso contrário (se o conteúdo da variável TENSAO_SAIDA é NULA), então:
 - modificar o estado das chaves do conversor a fim de aplicar tensão plena sobre a carga, enviando a palavra de controle armazenada em CONFIG_CHAVES[PLENA] pela porta CHAVES1A8.
 - iniciar a contagem do tempo T_{on} , programando o temporizador com VALOR_TON pela porta LOADTIMER.
 - carregar o valor PLENA na variável de controle TENSAO_SAIDA.
- Enviar sinal de fim de interrupção para o controlador de interrupções do computador do módulo de controle.

c) Procedimento de finalização:

- Desabilitar o atendimento de interrupções solicitadas pelo módulo de interfaces.
- Enviar comando para abertura de todas as chaves, da mesma maneira que no procedimento de inicialização.
- Restaurar o conteúdo original do vetor de interrupção utilizado para a instalação do procedimento de acionamento das chaves.
- Encerrar a execução do programa.

d) Programa principal:

- Executar o procedimento de inicialização.
- Executar repetidamente o seguinte ciclo de diálogo com o operador:
 - Apresentar menu com as seguintes opções para controle da operação do conversor:
 1. (Re)definir ciclo de trabalho, frequência e polaridade
 2. (Re)iniciar o acionamento das chaves
 3. Interromper o acionamento das chaves
 4. Encerrar o programa
 - Obter a opção escolhida pelo operador.
 - De acordo com a opção escolhida, executar as instruções seguintes:
 - 1: Obter do usuário um valor entre 0% e 100% para o ciclo de trabalho, um valor para a frequência de chaveamento e informação a respeito da polaridade (+ ou -) desejada para a saída do conversor. A partir do ciclo de trabalho e da frequência especificados, calcular os valores VALOR_TON e VALOR_TOFF, a serem programados no temporizador a fim de produzir os atrasos T_{on} e T_{off} . Os valores das variáveis VALOR_TON e VALOR_TOFF são obtidos das seguintes expressões:

$$\text{VALOR_TON} = (\text{ciclo de trabalho}/100) \times f_{\text{clock}} / f_{\text{chaveamento}}$$

$$\text{VALOR_TOFF} = (1 - \text{ciclo de trabalho}/100) \times f_{\text{clock}} / f_{\text{chaveamento}}$$

onde f_{clock} é a frequência do clock do temporizador e $f_{\text{chaveamento}}$ é a frequência de chaveamento desejada para o "chopper".

De acordo com a informação de polaridade obtida, carregar a variável CONFIG_CHAVES com as seguintes palavras de controle:

para polaridade positiva:

CONFIG_CHAVES[PLENA] \leftarrow 11011101 em binário ou DD em hexadecimal (fechar as chaves 2 e 6)

CONFIG_CHAVES[NULA] \leftarrow 11111101 em binário ou FD em hexadecimal (abrir a chave 6 e manter a chave 2 fechada)

para polaridade negativa:

CONFIG_CHAVES[PLENA] \leftarrow 11101011 em binário ou EB em hexadecimal (fechar as chaves 3 e 5)

CONFIG_CHAVES[NULA] \leftarrow 11111011 em binário ou FB em hexadecimal (abrir a chave 5 e manter a chave 3 fechada)

Obs.: caso se deseje operar momentaneamente no segundo ou no quarto quadrante, basta fazer CONFIG_CHAVES[PLENA] \leftarrow 11111111 em binário ou FF em hexadecimal (abrir todas as chaves) antes de reverter a polaridade, enquanto a corrente na carga não reverte; para isto, porém, é necessário monitorar a corrente da carga.

- 2: Habilitar o atendimento de interrupções solicitadas pelo temporizador do módulo de interfaces, que ativarão o procedimento de acionamento

das chaves. Em seguida, inicializar a variável TENSÃO_SAÍDA e carregar o temporizador com o valor 0 (contagem máxima), para que ao final da contagem seja solicitada a primeira interrupção. Estas instruções só devem ser executadas se já foram definidos valores para o ciclo de trabalho, frequência e polaridade na opção 1.

- 3: Desabilitar o atendimento de interrupções solicitadas pelo temporizador do módulo de interfaces e desligar todas as chaves.
- 4: Executar o procedimento de finalização.

No apêndice B é apresentada uma listagem do software de controle utilizado neste exemplo.

O programa de controle foi executado, utilizando-se como carga um módulo de motor CC ligado em série com um módulo de indutância. Na figura IV.9, são mostradas as formas de onda de tensão e corrente na carga, para operação em regime de condução contínua no primeiro quadrante, com ciclo de trabalho de 90%.

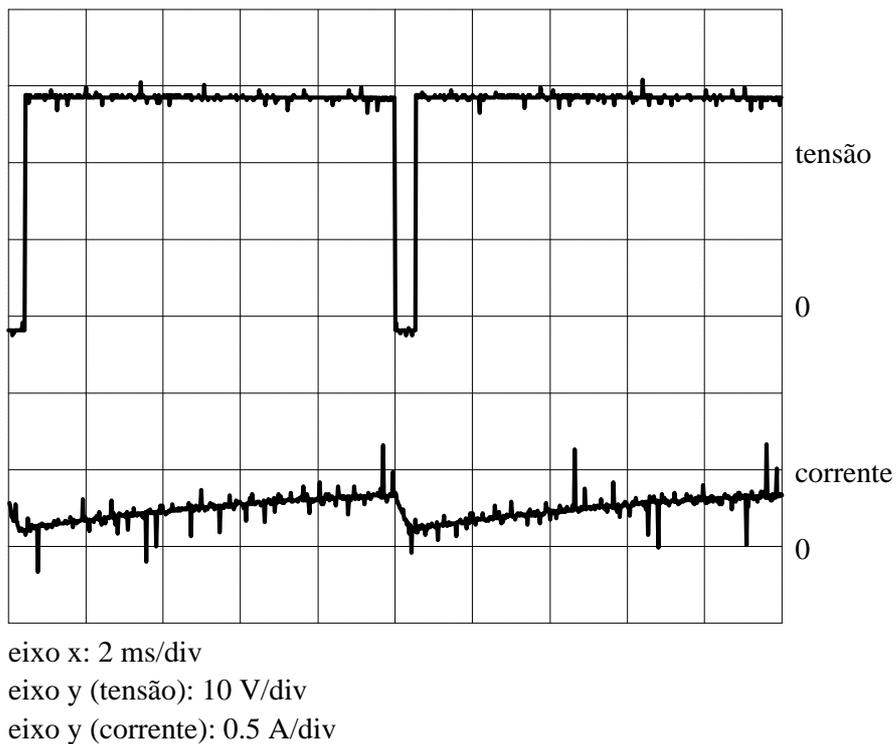


Figura IV.9 - Tensão e corrente em um motor CC operando no primeiro quadrante, em regime de condução contínua.

Na figura IV.10, o ciclo de trabalho foi reduzido a 50%, fazendo a carga entrar em regime de condução descontínua.

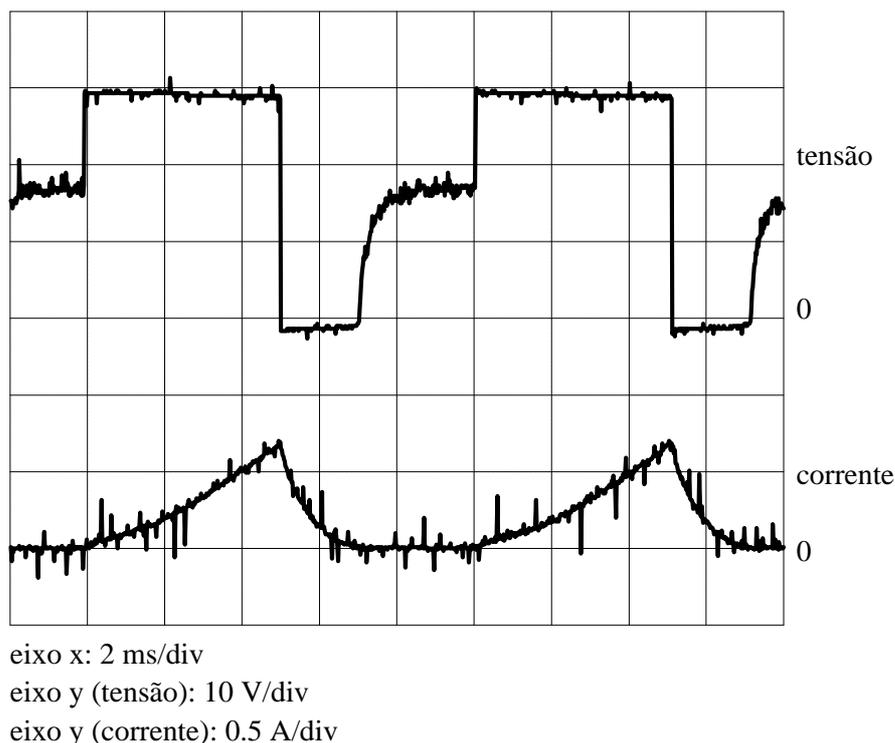


Figura IV.10 - Tensão e corrente em um motor CC operando no primeiro quadrante, em regime de condução descontínua

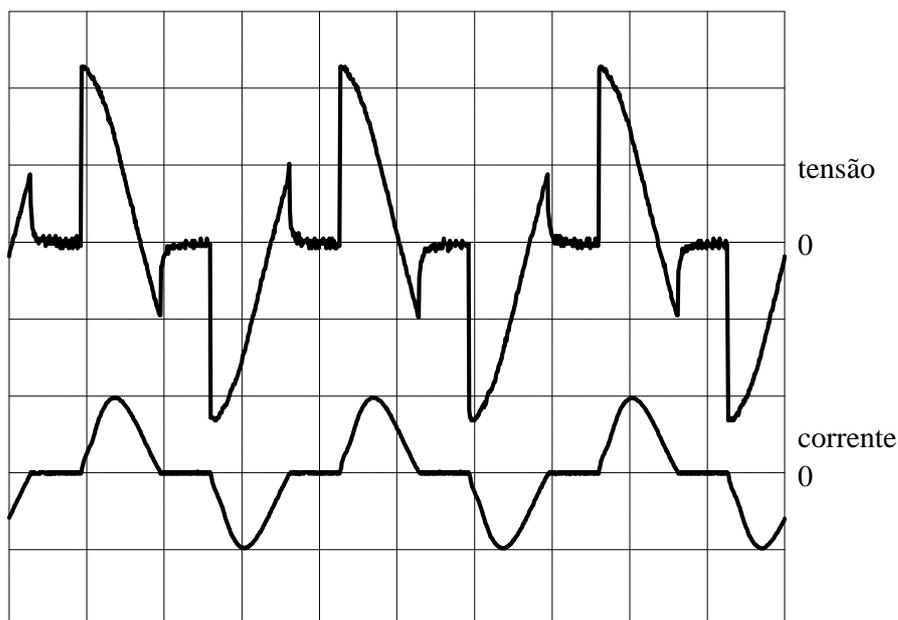
Devido ao tempo gasto no protocolo de atendimento às interrupções que ativam o procedimento de acionamento das chaves, existe um limite inferior para o intervalo de tempo entre duas mudanças de estado sucessivas das chaves do conversor. Este tempo é uma característica intrínseca do computador utilizado no módulo de controle. No protótipo implementado, no qual foi utilizado um computador tipo PC-XT de 10MHz, este tempo foi determinado experimentalmente como sendo de aproximadamente 0,4 ms. A título de exemplo, para uma frequência de chaveamento de 100 Hz, este tempo corresponde a limites de 4% e 96% para os ciclos de trabalho mínimo e máximo respectivamente. Com a utilização de um computador mais rápido no módulo de controle, esta limitação pode ser superada, permitindo-se operar o conversor a frequências de chaveamento mais elevadas.

IV.3 - OUTRAS APLICAÇÕES

Além dos exemplos apresentados detalhadamente na seção IV.2, diversas outras aplicações foram testadas no protótipo desenvolvido. Nesta seção, algumas destas aplicações são relacionadas, comentando-se as eventuais limitações e adaptações requeridas para sua implementação.

(i) regulador de tensão CA monofásico com controle de fase

O princípio de operação deste tipo de conversor é essencialmente o mesmo que o do retificador monofásico controlado. Entretanto, a topologia é mais simples, utilizando-se apenas um módulo de chave com TRIAC. O programa de controle necessita então enviar um único bit de controle a cada ciclo, sempre para a mesma chave, não sendo necessário testar a porta SINCR. Contudo, o temporizador do módulo de interfaces deve continuar operando no modo sincronizado e o ângulo de disparo deve ser sempre menor que 180° . Na figura IV.11 são mostradas formas de onda de tensão e corrente de saída de um regulador de tensão CA implementado no protótipo desenvolvido, alimentando uma carga RL.



eixo x: 5 ms/div
 eixo y (tensão): 20 V/div
 eixo y (corrente): 1 A/div

Figura IV.11 - Tensão e corrente de saída num regulador CA com carga RL.

(ii) inversor monofásico de onda retangular

A topologia utilizada neste tipo de conversor é a mesma que a do "chopper" de quatro quadrantes, mostrada nas figuras IV.7 e IV.8 , e o seu software de controle é bastante parecido com o daquele conversor. Na verdade, o controle é mais simples, pois não é necessário variar o ciclo de trabalho, nem mudar as palavras de controle das chaves conforme o quadrante em que se está operando. Em vez de programar o temporizador alternadamente com os valores relativos a T_{on} e T_{off} , é preciso apenas programar o valor relativo a um semiciclo da tensão de saída, na frequência desejada. Quanto às palavras de controle a serem enviadas às chaves, em vez de comandar a aplicação de tensão plena ou nula sobre a carga, devem fazer com que seja aplicada tensão positiva ou negativa em cada semiciclo. Para isso, deve-se acionar as chaves 3

e 5 ou as chaves 2 e 6 alternadamente, com base no esquema mostrado na figura IV.8. Contudo, entre o desligamento de um par de chaves e o ligamento do outro, deve-se desligar todas as chaves para evitar que a fonte de alimentação seja momentaneamente curto-circuitada, devido ao atraso no desligamento das chaves transistorizadas.

(iii) retificador trifásico de onda completa com controle de fase

Na implementação deste conversor, são utilizadas seis chaves tiristorizadas, cada qual interligando uma fase da entrada CA com um dos terminais (positivo ou negativo) da saída CC. O temporizador do módulo de interfaces opera no modo sincronizado, a exemplo do retificador monofásico. Contudo, o circuito de sincronismo deve operar no modo de comparação entre fases, uma vez que os instantes em que as chaves ficam diretamente polarizadas, e que servem de referência para a contagem do ângulo de disparo, coincidem com os instantes em que as tensões entre duas fases se igualam. No momento em que vai-se disparar uma chave qualquer, deve-se testar os três bits da porta SINCR (A',B' e C'), para se determinar qual é a chave que deve ser disparada. Durante um ciclo de operação deste conversor, as seis chaves são disparadas, uma de cada vez, com intervalos de tempo iguais entre dois disparos consecutivos. Isto requer que o módulo de interfaces solicite uma interrupção para acionamento de chaves a cada 60° do ciclo da tensão de alimentação, cuja frequência é de 60 Hz. Este fato introduz uma complicação adicional no controle, quando o ângulo de disparo é maior que 60° . Nesta situação, se o temporizador for programado para uma contagem de tempo equivalente ao valor total do ângulo de disparo, o circuito de sincronismo irá redisparar o contador antes do fim da contagem, evitando que seja solicitada a interrupção devida. Para contornar este problema, o temporizador deve ser sempre programado para contagens de tempo

equivalentes ao resto da divisão inteira entre o ângulo de disparo desejado e o ângulo de 60° . Os testes dos bits da porta SINCR, realizados na rotina de acionamento das chaves, também devem ser modificados cada vez que o ângulo de disparo excede um múltiplo de 60° .

Se as entradas A,B e C do circuito de sincronismo forem ligados às fases a,b e c respectivamente, e a seqüência de fases for abc, então as saídas A', B' e C' (bit0, bit1 e bit2 da porta SINCR) refletirão instantaneamente as relações de magnitude entre as tensões nas fases, da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll}
 A' (\text{bit0}) = 1 \rightarrow v_a > v_b & A' (\text{bit0}) = 0 \rightarrow v_a < v_b \\
 B' (\text{bit1}) = 1 \rightarrow v_b > v_c & B' (\text{bit1}) = 0 \rightarrow v_b < v_c \\
 C' (\text{bit2}) = 1 \rightarrow v_c > v_a & C' (\text{bit2}) = 0 \rightarrow v_c < v_a
 \end{array}$$

Os critérios para se determinar que chave deve ser disparada a cada interrupção, com base nas saídas A',B' e C' do circuito de sincronismo e dependendo da faixa de ângulo de disparo desejada, são apresentados na tabela IV.1. Nesta tabela, é utilizada a seguinte nomenclatura: A+ é a chave que liga a fase a da entrada com o terminal + da saída. A mesma regra se aplica aos nomes das demais chaves.

chave a disparar	faixa de ângulo de disparo	
	0° - 60°	60° - 120°
A+	A'=1, B'=0 e C'=0	A'=0, B'=1 e C'=0
B+	A'=0, B'=1 e C'=0	A'=0, B'=0 e C'=1
C+	A'=0, B'=0 e C'=1	A'=0, B'=1 e C'=1
A-	A'=0, B'=1 e C'=1	A'=1, B'=0 e C'=1
B-	A'=1, B'=0 e C'=1	A'=1, B'=1 e C'=0
C-	A'=1, B'=1 e C'=0	A'=1, B'=0 e C'=0

Tabela IV.1 - Critérios para determinação da chave a ser disparada

Na figura IV.12 são mostradas formas de onda de tensão e corrente de saída de um retificador trifásico implementado no protótipo desenvolvido.

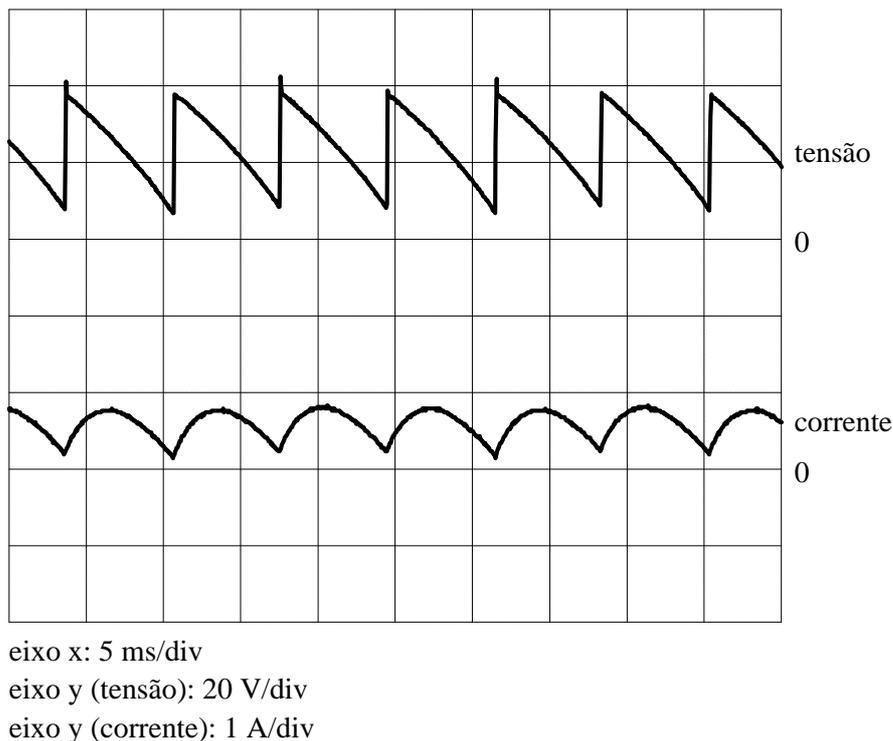


Figura IV.12 - Tensão e corrente num retificador trifásico com carga RL.

(iv) inversor trifásico de onda retangular

Neste conversor, são utilizadas seis chaves transistorizadas, cada qual interligando um terminal (positivo ou negativo) da entrada CC com uma fase da saída CA. Há duas formas clássicas de se comandar as chaves do conversor. Uma delas consiste em fazer as chaves do conversor conduzirem por intervalos de 180° ; a outra consiste em fazer as chaves conduzirem por intervalos de 120° . Qualquer que seja a forma de controle empregada, o procedimento utilizado no programa de controle para acionar as chaves é o mesmo. Deve-se determinar previamente a seqüência de acionamento das chaves e armazenar as palavras de controle necessárias para realizar esta seqüência em um vetor, na ordem apropriada. Durante a execução do programa, a rotina de acionamento das chaves, acionada por interrupção, pega uma palavra de controle do vetor e envia pela porta de controle das chaves. Na interrupção seguinte,

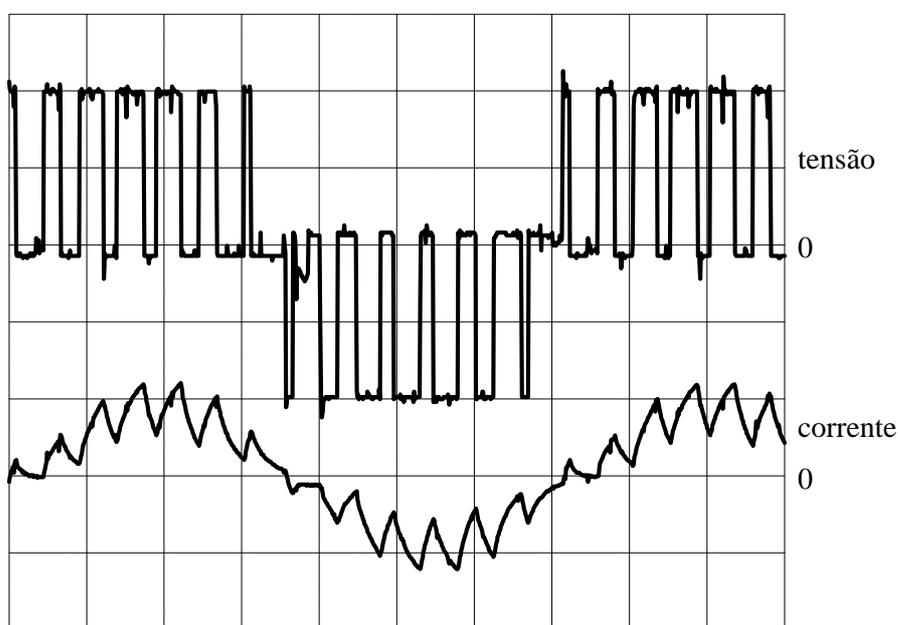
envia a palavra seguinte, e assim por diante, varrendo circularmente o vetor que contém as palavras de controle. Em um ciclo de operação do conversor ocorrem seis mudanças de estado nas chaves do conversor, a intervalos de tempo iguais. Por isso, a cada interrupção o temporizador deve ser programado com um valor de contagem equivalente a $1/6$ de ciclo.

(v) inversor monofásico com modulação por largura de pulso (PWM)

Este conversor utiliza a mesma topologia que o inversor monofásico de onda retangular, mas é empregada uma técnica de controle diferente. Para implementar esta técnica de controle, utiliza-se o mesmo esquema de vetor de palavras de controle descrito no item (iv). Neste caso, porém, os intervalos de tempo entre as mudanças de estado das chaves do conversor não são iguais. O programa de controle deve dispor, então, de uma rotina para cálculo "off-line" dos intervalos de tempo entre cada acionamento das chaves do conversor. Estes intervalos são também armazenados em um vetor, ordenados na mesma seqüência do vetor que contém as palavras de controle para o acionamento das chaves. Durante a execução do programa de controle, a rotina de acionamento das chaves, acionada por interrupção, pega uma palavra de controle do respectivo vetor e envia pela porta de controle das chaves. Em seguida, carrega o temporizador com o valor de contagem de tempo correspondente à configuração de chaves estabelecida., valor este armazenado no vetor de intervalos de tempo. Na interrupção seguinte, o procedimento é repetido, com os elementos seguintes de ambos os vetores. Quando os últimos elementos dos dois vetores são processados, o a rotina de acionamento das chaves continua reprocessando os primeiros elementos, de maneira cíclica. Os intervalos de tempo entre acionamentos consecutivos nunca devem ser menor que o tempo necessário para encerrar uma interrupção e iniciar outra, que é de cerca de 0,4 ms no protótipo desenvolvido. Este

limite se reflete na largura do pulso de menor duração da onda de tensão de saída do conversor.

Na figura IV.13 são mostradas formas de onda de tensão e corrente de saída de um inversor PWM monofásico implementado no protótipo desenvolvido.



eixo x: 5 ms/div
eixo y (tensão): 10 V/div
eixo y (corrente): 1 A/div

Figura IV.13 - Tensão e corrente num retificador pwm monofásico com carga RL.

(vi) controle em malha fechada de um motor CC

Nesta aplicação, é utilizado um "chopper" de quatro quadrantes, cujo programa de acionamento foi descrito na seção IV.2. Porém, a variação do ciclo de

trabalho é feita em tempo real, por um sistema de controle de malha fechada. Este sistema de controle tem como variável controlada a velocidade angular do eixo do motor, que é medida através do circuito de aquisição de dados do módulo de interfaces. O programa de acionamento incorpora um algoritmo de controle proporcional+integral, que recebe como entrada o desvio entre uma referência de velocidade e a velocidade medida pelo sistema de aquisição de dados, e fornece como saída um valor de ciclo de trabalho. Para que os intervalos de amostragem da variável controlada sejam uniformes, deve ser utilizada uma rotina de interrupção para fazer a aquisição de dados. Esta rotina pode ser acionada pelo "tick" do relógio, um sinal de interrupção existente no computador do módulo de controle. Contudo, este artifício não permite implementar malhas de controle muito rápidas, uma vez que os "ticks" do relógio ocorrem a intervalos de aproximadamente 50 ms. Cabe aqui lembrar que o ciclo de trabalho deve ser limitado, conforme explicado na seção IV.2.

Na instalação das rotinas de interrupção para acionamento das chaves e aquisição de dados, deve ser dada maior prioridade à primeira, para que seja assegurada a regularidade da forma de onda de tensão produzida pelo conversor.

No protótipo desenvolvido, dificilmente se consegue operar este tipo de conversor com frequências de chaveamento superiores a 100 Hz. Esta frequência é da mesma ordem de grandeza que a frequência de corte do circuito de armadura do motor utilizado como módulo de carga. Isto inviabiliza a implementação de um controle da corrente de armadura em malha fechada. Com a utilização de um computador mais rápido no módulo de controle, esta implementação pode ser viabilizada.

IV.4 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados exemplos de utilização do laboratório didático desenvolvido, com o objetivo de se avaliar as potencialidades de implementação de diversos tipos de conversores. Estes exemplos revelaram algumas limitações do equipamento, principalmente no que se refere à rapidez do computador do módulo de controle. Contudo, o desempenho global pode ser considerado satisfatório, uma vez que é possível implementar com bastante facilidade, dentro das limitações do equipamento, grande parte das funções básicas de conversão.

É importante salientar que os exemplos apresentados não esgotam as potencialidades do laboratório, havendo ainda bastante trabalho a ser feito no sentido de se desenvolver novas aplicações e aperfeiçoar o equipamento. No capítulo V, juntamente com as conclusões gerais sobre este trabalho, serão apresentadas sugestões para melhorias e desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

V.1 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento de um laboratório didático, com o qual se pretende contribuir para a melhoria da qualidade do ensino de Eletrônica de Potência. Este laboratório foi concebido segundo uma estrutura modular, na qual as diversas funções presentes em conversores eletrônicos de potência são implementadas em módulos separados e interconectáveis. As funções relativas à lógica de acionamento de chaves e ao controle realimentado de conversores são implementadas em software, num microcomputador pessoal. A concepção desenvolvida é inovadora em comparação com os equipamentos didáticos encontrados no mercado. Com ela pretendeu-se criar um laboratório versátil e de baixo custo.

A concepção do equipamento teve como objetivo principal a criação de facilidades operacionais para o estudo do funcionamento de conversores estáticos de uma forma sistêmica, sob a ótica da matriz-chaveamento. Nas especificações de projeto, deu-se bastante atenção aos aspectos de segurança e funcionalidade. Uma importante característica do equipamento, resultante da concepção modular, é a sua expansibilidade, que permite mantê-lo atualizado com a evolução tecnologia da Eletrônica de Potência através da incorporação de poucos módulos.

Foi projetado e construído um protótipo segundo a concepção desenvolvida, e foram apresentados diversos exemplos de utilização, a título de validação experimental. Os exemplos apresentados comprovaram a versatilidade do equipamento, tendo sido feitas implementações de diferentes funções de conversão com grande rapidez e facilidade. Contudo, os testes de validação revelaram também algumas limitações no projeto do protótipo, principalmente no que se refere à temporização. A demora do computador do módulo de controle no processamento de interrupções limita a frequência de acionamento das chaves e restringe as possibilidades de implementação de malhas de realimentação rápidas, como por exemplo para controle de corrente.

Como conclusão geral, acredita-se que a concepção do laboratório proposto neste trabalho é viável e apresenta um grande potencial para expansão e desenvolvimento de novas aplicações. Porém, com relação ao protótipo desenvolvido, as melhorias relacionadas a seguir ajudariam a explorar melhor as potencialidades do equipamento.

- utilização de um computador mais rápido no módulo de controle (386 ou 486).

- utilização de um sub-sistema de aquisição de dados mais rápido no módulo de interfaces.

Com relação às aplicações, propõe-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- desenvolvimento de uma interface amigável e didática para o software de controle, incluindo ferramentas de análise das formas de onda produzidas,
- implementação de controle da corrente de armadura no acionamento de máquinas de corrente contínua,
- implementação de técnicas de controle de máquinas de corrente alternada,
- avaliação pedagógica do desempenho do equipamento.

REFERÊNCIAS

1. Wood, P. - "Switching Power Converters", Van Nostrand (1981).
2. Bose, B.K. - "Recent Advances in Power Electronics", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 7, No. 1: 2-10 (1992).
3. Hukai, R.Y. - "Mudanças Tecnológicas como Instrumentos de uma Nova Estratégia para Conservação de Eletricidade", Anais do Seminário Alternativas para uma Política Energética, CPFL: 2-10 (1985).
4. Hicock, H.N. - "Adjustable Speed - A Tool for Saving Energy in Pumps, Fans, Blowers and Compressors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 1: 124-136 (1985).
5. Eto, J.H., Almeida, A. - "Saving Electricity in Commercial Buildings with Adjustable-Speed Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 24, No. 3: 439-443 (1988).
6. Oliveira, J.J.R. - "Proposta de um Sistema de Monitoração para Circuitos Trifásicos", Tese, COPPE/UFRJ (1992).
7. Lataire, P., Maggetto, G. - "Modern Teaching on Variable Speed Induction Motor Drives", Proceedings of EPE'89: 1445-1448 (1989).
8. Robinson, I.M. - "An Undergraduate Power Electronics Laboratory", Int. J. Elect. Eng. Educ., Vol 24: 239-249 (1987).
9. Hobson, L., Hunt, A. - "Serious Research and Undergraduate Projects in Power Electronics", Int. J. Elect. Eng. Educ., Vol. 23: 65-76 (1986).
10. Finch, J.W. et al. - "Field Orientated Induction Motor Drives: A Practical Implementation Facility", Proceedings of ICEM'90: 1272-1277 (1990).

11. Yeung, W.K. - "Power Electronics Laboratory Development for Higher Diploma and Higher Certificate Courses", *Int. J. Elect. Eng. Educ.*, Vol. 27: 160-166 (1990).
12. Rey, J.P. et al. - "Development of a Modern Static Electric Drives Laboratory", *Anais do 1º Encontro Regional de Automação e Instrumentação - E.S.: AE-32/AE-38* (1991).
13. Bonert, R. - "The microprocessor as a tool in the teaching of power electronic circuits and controlled electric drives", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 1: 247-251 (1987).
14. Dewan, S.B. et al. - "Teaching of Power Electronics", *IEEE 1979 Frontiers in Education Conference Proceedings*: 177-181 (1979).
15. Novotny, D.W. et al. - "The Electric Machines and Power Electronics Laboratory at the University of Wisconsin", *Proceedings of ICEM'90*: 305-308 (1990).
16. Miller, T.J.E. et al. - "The Power-Electronics Teaching Laboratory at Glasgow University", *Proceedings of EPE'91*, Vol. 2: 540-545 (1991).
17. Krein, P.T., Sauer, P.W. - "An Integrated Laboratory for Electric Machines, Power Systems and Power Electronics", *Proceedings of 1991 IEEE Summer Meeting*: 1-7 (1991).
18. Bernstein, T. - "Electrical Shock Hazards and Safety Standards", *IEEE Transactions on Education*, Vol. 34, No. 3: 216-222 (1991).
19. Hingorani, N.G. - "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 76, No. 4: 481-482 (1988).
20. Taurus Eletrônica - "Manual de operação da placa de aquisição de dados ADA - Versão 2.1" (1987).

APÊNDICE A

A.1 - FABRICANTES DE EQUIPAMENTOS DIDÁTICOS

1. Siemens AG - Alemanha
2. Lucas-Nülle Lehr- und Meßgeräte GmbH - Alemanha
3. Société Terel - França
4. Datapool Eletrônica Ltda. - Brasil
5. Haven Automation Ltd. - Reino Unido
6. TQ International - Reino Unido
7. hps System Technik - Alemanha
8. Degem Systems Ltd. - Israel

APÊNDICE B

B.1 - SÍMBOLOS UTILIZADOS NO SOFTWARE DE CONTROLE

SHCTRL	=	308 hexadecimal
ADCTRL	=	304 "
ADMSB	=	302 "
ADLSB	=	300 "
SINCR	=	30A "
SETTIMERMODE	=	30F "
LOADTIMER	=	30D ou 30E hexadecimal (depende do modo)
CHAVES1A8	=	30A hexadecimal
CHAVE9	=	30B "
SINC	=	B2 "
NOSINC	=	70 "

B.2 - LISTAGENS DO SOFTWARE DE CONTROLE

B.2.1 - Biblioteca de rotinas utilizadas nos programas de controle

```

UNIT elopot;

INTERFACE

USES Crt,Dos;

CONST

{ definicao de enderecos das portas de entrada e saida: }
sincr          = $30A; { circuito de sincronismo }
chaves1a8      = $30A; { acionamento das chaves }

{ definicao de comandos para os dispositivos }
sinc           = $B2; { coloca temporizador em modo
                      sincronizado }
nosinc        = $70; { coloca temporizador em modo nao
                      sincron. }
intrctrlrchip = $20; { controlador de interrupcao 8259 }
eoi           = $20; { sinal de fim de interrupcao para o
                      8259 }

VAR

loadtimer : INTEGER;

PROCEDURE obtem_valor ( VAR variavel : integer;
                       mensagem : STRING;
                       liminf    : INTEGER;
                       limsup    : INTEGER );

PROCEDURE programa_modo_temporizador ( modo : INTEGER );

PROCEDURE carrega_temporizador( tempo : INTEGER );

PROCEDURE instala_rotina_interrupcao_aciona_chaves
( endereco : POINTER );

PROCEDURE habilita_interrupcao_aciona_chaves;

```

```

PROCEDURE desabilita_interrupcao_aciona_chaves;

PROCEDURE restaura_vetor_interrupcao_aciona_chaves;

IMPLEMENTATION

CONST

{ definicao de enderecos das portas de entrada e saida: }
settimermode = $30F; { programacao do temporizador }
timerclockdiv = $30C; { div. de freq. do temporizador }

{ outras constantes }
IRQ2 = 10; { no. do vetor de interrupcao do canal IRQ2 }
IRQ3 = 11; { no. do vetor de interrupcao do canal IRQ3 }

VAR

timermode      : INTEGER;
guardavetorIRQ2 : POINTER;
guardavetorIRQ3 : POINTER;

PROCEDURE buffered_keyboard_input ( VAR str : string;
                                   buflen : integer );

{ ***** }
{ Esta rotina faz a leitura de uma string do console }
{ num campo limitado, com tamanho dado pelo parametro }
{ buflen, atraves de um servico do DOS. }
{ ***** }

VAR buffer : array[0..80] of byte;
    regs   : registers;
    i      : integer;

BEGIN

buffer[0] := buflen;
regs.ah := 10; {No. do servico DOS de leitura do console}
regs.ds := seg(buffer);
regs.dx := ofs(buffer);
MsDos(regs);
str := '';
for i :=1 to buffer[1] DO
    str := str + chr(buffer[i+1]);

END;

```

```

PROCEDURE obtem_valor ( VAR variavel : integer;
                        mensagem : STRING;
                        liminf   : INTEGER;
                        limsup   : INTEGER );

VAR input_string : string;
    erro         : INTEGER;

BEGIN

REPEAT
GoToXY(25,20);
write('digite novo valor para ',mensagem,
      ' entre ',liminf,' e ',limsup,': ');
ClrEol;
buffered_keyboard_input(input_string,4);
Val(input_string,variavel,erro);
IF ((variavel<=liminf) or (variavel>=limsup)) THEN
erro:=1;
IF erro <> 0 THEN
    BEGIN
    GoToXY(25,21);
    write('esta errado, digite de novo.');
```

```

    END;
UNTIL erro=0;

GoToXY(25,20); ClrEol;
GoToXY(25,21); ClrEol;

END;

PROCEDURE programa_modo_temporizador ( modo : INTEGER );

BEGIN

port[settimermode] := modo;
IF modo=nosinc THEN
    BEGIN
    port[settimermode] := $36;
    port[timerclockdiv]:= lo(2);
    port[timerclockdiv]:= hi(2);
    END;
timermode := modo;

END;
```

```

PROCEDURE carrega_temporizador( tempo : INTEGER );
{ o parametro tempo corresponde a uma quantidade inteira
  de micro-segundos }

VAR

contagem : INTEGER;

BEGIN

contagem := round(tempo/0.4);
port[loadtimer] := lo(contagem);
port[loadtimer] := hi(contagem);

END;

PROCEDURE instala_rotina_interrupcao_aciona_chaves
( endereco : POINTER );
BEGIN

CASE timermode OF

    sinc : BEGIN
        GetIntVec(IRQ3,guardavetorIRQ3);
        SetIntVec(IRQ3,endereco);
        END;

    nosinc : BEGIN
        GetIntVec(IRQ2,guardavetorIRQ2);
        SetIntVec(IRQ2,endereco);
        END;

    END; { do comando CASE }

END;

PROCEDURE habilita_interrupcao_aciona_chaves;
BEGIN

CASE timermode OF

    sinc : port[$21] := port[$21] and not($01 shl 3);

    nosinc : port [$21] := port[$21] and not($01 shl 2);

    END; { do comando CASE }

```



```

{
{ Este programa controla a tensao de saida de um
{ retificador monofasico atraves da variacao do angulo
{ de disparo de seus tiristores.
{
{ Autor: Guilherme Rolim
{
{ Data da ultima alteracao: 28/01/93
{
{*****}

```

```
CONST
```

```
nul = #0;
```

```
VAR
```

```

ja_definiu_ang   : boolean;
tempo            : integer;
opcao            : char;
ang_disp         : integer;

```

```
PROCEDURE aciona_chaves; INTERRUPT;
```

```

CONST positiva = $01;
      negativa = $00;

```

```
VAR polaridade_entrada : byte;
```

```
BEGIN
```

```
polaridade_entrada := port[sincr] and $01;
```

```

{ a instrucao acima isola o bit 1 (A') da porta sincr,
{ na variavel polaridade_entrada. A'=0 significa
{ polaridade positiva da tensao de entrada. A'=1
{ significa polaridade negativa.
}
}

```

```
CASE polaridade_entrada of
```

```
    positiva: port[chaves1a8] := $DD;
```

```
    negativa: port[chaves1a8] := $EB;
```

```
    END;
```

```
Delay(1);
```

```
port[chaves1a8]:=$FF; {abre todas as chaves da matriz}
```

```
port[intrctrlrchip]:= eoi; {sinaliza fim de interrupcao}
```

```
END;
```

```
PROCEDURE inicializa;
```

```
BEGIN
```

```
ja_definiu_ang := false;
programa_modos temporizador (sinc);
instala_rotina_interrupcao_aciona_chaves(@aciona_chaves);
port[chaves1a8] := $FF;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE finaliza;
```

```
BEGIN
```

```
desabilita_interrupcao_aciona_chaves;
restaura_vetor_interrupcao_aciona_chaves;
port[chaves1a8] := $FF;
Halt
```

```
END;
```

```
{*****}
```

```
BEGIN { PROGRAMA PRINCIPAL }
```

```
inicializa;
```

```
ClrScr; { limpa a tela }
```

```
GoToXY(25,12);
write('ESCOLHA UMA OPCAO:');
GoToXY(25,14);
write('1. (re)definir o angulo de disparo');
GoToXY(25,15);
write('2. (re)iniciar o acionamento das chaves');
GoToXY(25,16);
write('3. interromper o acionamento das chaves');
GoToXY(25,17);
write('4. encerrar o programa');
```

```
REPEAT
```

```
opcao := ReadKey;
```

```

CASE opcao OF
    '1': BEGIN
        obtem_valor(ang_disp,
                    'angulo de disparo', { mensagem }
                    0,    { limite inferior }
                    180); { limite superior }
        tempo := round((ang_disp/360)*1.0E6/60);
        carrega_temporizador(tempo);
        ja_definiu_ang := true;

        END;

    '2': IF ja_definiu_ang THEN
        habilita_interrupcao_aciona_chaves
        ELSE
        BEGIN
        GoToXY(25,21);
        writeln('angulo de disparo nao definido');
        REPEAT UNTIL KeyPressed;
        GoToXY(25,21);
        ClrEol;
        END;

    '3': BEGIN
        desabilita_interrupcao_aciona_chaves;
        port[chaves1a8] := $FF;
        END;

    '4': finaliza;

nul: opcao := ReadKey;

    END;

UNTIL false;

```

B.2.3 - Programa de controle do exemplo IV.2.2.

```

PROGRAM chopper_de_quatro_quadrantes;

USES    Crt, elopot;

{ ***** }
{ }

```

```

{ Este programa controla a tensao de saida de um
{ chopper de quatro quadrantes atraves da variacao
{ do seu ciclo de trabalho.
{
{ Autor: Guilherme Rolim
{
{ Data da ultima alteracao: 28/01/93
{
{*****}

```

```
TYPE
```

```
intens = (plena,nula);
```

```
CONST
```

```
nul      = #0;
fclock  = 1.0e6;
```

```
VAR
```

```
ja_definiu_ciclo : BOOLEAN;
opcao             : CHAR;
tensao_saida     : intens;
config_chaves    : ARRAY[intens] of BYTE;
valor_ton        : INTEGER;
valor_toff       : INTEGER;
polaridade       : CHAR;
ciclo            : INTEGER;
freq             : INTEGER;
lixo             : CHAR;
```

```
PROCEDURE aciona_chaves ; INTERRUPT;
```

```
BEGIN
```

```
CASE tensao_saida OF
```

```

  plena : BEGIN
            port[chaves1a8] := config_chaves[nula];
            carrega_temporizador(valor_toff);
            tensao_saida := nula;
            END;

  nula  : BEGIN
            port[chaves1a8] := config_chaves[plena];
            carrega_temporizador(valor_ton);
            tensao_saida := plena;
            END;

```

```

        END;

port[intrctrlrchip]:=eoi; {sinal de fim de interrupcao}

END;

PROCEDURE inicializa;

BEGIN
ja_definiu_ciclo := false;
programa_modo_temporizador(nosinc);
instala_rotina_interrupcao_aciona_chaves(@aciona_chaves);
port[chaves1a8] := $FF
END;

PROCEDURE finaliza;

BEGIN
desabilita_interrupcao_aciona_chaves;
restaura_vetor_interrupcao_aciona_chaves;
port[chaves1a8] := $FF;
Halt
END;

{*****}

BEGIN { PROGRAMA PRINCIPAL }

inicializa;

ClrScr;

GoToXY(25,12);
write('ESCOLHA UMA OPCAO:');
GoToXY(25,14);
write('1. (re)definir ciclo de trab.,freq. e
polaridade');
GoToXY(25,15);
write('2. (re)iniciar o acionamento das chaves');
GoToXY(25,16);
write('3. interromper o acionamento das chaves');
GoToXY(25,17);
write('4. encerrar o programa');

REPEAT

```

```

opcao := ReadKey;

CASE opcao OF

    '1': BEGIN

        obtem_valor (freq,
                    'frequencia (Hz)',
                    20,
                    500);

        obtem_valor (ciclo,
                    'ciclo de trabalho (%)',
                    5,
                    95);

        REPEAT
        GoToXY(25,20);
        write('digite nova polaridade ("+" ou "-"): ');
        ClrEol;
        polaridade := Readkey; write(polaridade);
        IF polaridade=nul THEN lixo:=Readkey;
        IF ((polaridade<>'+') and (polaridade<>'-'))

THEN

        BEGIN
        GoToXY(25,21);
        write('esta errado, digite de novo. ');
        REPEAT UNTIL KeyPressed;
        GoToXY(25,21); ClrEol;
        END;
        UNTIL ((polaridade='+') or (polaridade='-'));
        GoToXY(25,20); ClrEol;

        valor_ton := round((ciclo/100)*fclock/freq);
        valor_toff := round((1-ciclo/100)*fclock/freq);

        CASE polaridade OF

            '+': BEGIN
                config_chaves[plena] := $EB;
                config_chaves[nula] := $FB;
            END;

            '-': BEGIN
                config_chaves[plena] := $DD;
                config_chaves[nula] := $DF;
            END;

        END;

        ja_definiu_ciclo := true;

    END;

```

```
'2': IF ja_definiu_ciclo
      THEN
      BEGIN
      habilita_interrupcao_aciona_chaves;
      tensao_saida := plena;
      carrega_temporizador(0);
      END
      ELSE
      BEGIN
      GoToXY (25,20);
      writeln ('parametros nao definidos ainda. ');
      REPEAT UNTIL KeyPressed;
      GoToXY (25,20); ClrEol;
      END;

'3': BEGIN
      desabilita_interrupcao_aciona_chaves;
      port[chaves1a8] := $FF;
      END;

'4': finaliza;

nul: opcao := ReadKey;

END;

UNTIL false;

END.
```