

JULIANO DE OLIVEIRA PACHECO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIDÁTICO
PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CA COM
MONITORAMENTO POR MICROCONTROLADORES**

FLORIANÓPOLIS, 2012

**INSITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO (LATO SENSU) EM
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS**

JULIANO DE OLIVEIRA PACHECO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIDÁTICO
PARA ENSINO DE CONVERSORES CC-CA COM
MONITORAMENTO POR MICROCONTROLADORES**

Monografia submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Professor Orientado: Clóvis Antônio Petry, Dr. Eng.

Co-orientador: Flávio Alberto Bardemaker Batista, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2012.

P116d Pacheco, Juliano de Oliveira

Desenvolvimento de um sistema didático para ensino de conversores CC-CA com monitoramento por microcontroladores [monografia] / Juliano de Oliveira Pacheco ; orientador, Clóvis Antônio Petry ; co-orientador, Flávio Alberto Bardemaker Batista. – Florianópolis, SC, 2012.

1 v. : il.

Monografia de especialização (Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Inclui referências.

1. Motor elétrico. 2. Conversor CC-CA. 3. Microcontrolador.
I. Petry, Clóvis Antônio. II. Batista, Flávio Alberto Bardemaker.
III. Título.

CDD: 621.381

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC

Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis

Catalogado por: Augiza Karla Boso CRB 14/1092

Rose Mari Lobo Goulart CRB 14/277

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIDÁTICO PARA
ENSINO DE CONVERSORES CC-CA COM
MONITORAMENTO POR MICROCONTROLADORES**

JULIANO DE OLIVEIRA PACHECO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Especialista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós-Graduação (Lato Sensu) em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de fevereiro de 2012.

Banca Examinadora:

Clóvis Antônio Petry, Dr.Eng.

Flávio Alberto B. Batista, Dr. Eng.

Charles Borges de Lima, Dr. Eng.

Mauro Tavares Peraça, Dr. Eng.

Dedico este trabalho a Deus.

Aos meus familiares.

Ao povo brasileiro.

“Solidários, seremos união. Separados uns dos outros seremos pontos de vista. Juntos, alcançaremos a realização de nossos propósitos.”

(Bezerra de Menezes)

“Quando alguém cair em erro, estendamos os braços em socorro do irmão equivocados, evitando a crítica que apenas o precipita a quedas ainda maiores. Lembremos que amanhã poderá ser a nossa vez de cair também.”

(Bezerra de Menezes)

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus pela vida e saúde.

Aos meus pais e avôs pelo carinho, amor, compreensão e apoio dados ao longo de minha vida, pois sou o que sou graças ao esforço e sacrifício deles.

Aos meus dois irmãos pela amizade e fraternidade e por me aturarem até hoje.

A minha namorada Vanessa pela atenção e paciência esperando ao meu lado o termino da monografia.

Ao professor Petry por me dar a honra de ser seu orientado.

Ao professor Flávio pela co-orientação e ajuda financeira.

Ao professor Charles pelas dicas e ensinamentos sobre microcontroladores.

Ao professor Leandro por conseguir a doação das placas de circuito impresso junto à empresa Digicart.

A empresa Digicart pela doação das placas de circuito impresso.

Aos meus amigos de toda a vida que de alguma forma contribuíram para minha formação como cidadão.

Aos amigos do IF-SC em especial: Adriano, Bernardo, Carlinhos, Devenz, Fusinato, Giovani, Jaicimara, Léo, Pedro.

Ao governo do estado de Santa Catarina pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos do Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior - FUMDES.

RESUMO

Atualmente na sociedade moderna, os acionamentos elétricos são de grande importância, pois se estima que cerca de 55% da energia consumida pelo país dá-se devido ao uso de motores elétricos, sendo que nos setores industriais são na maioria motores de indução trifásicos e, por tanto, são importantes para o desenvolvimento da sociedade. Assim, devido a grande utilização dos motores elétricos nos diversos setores produtivos e domésticos além da constante busca por produtos de melhor qualidade, tornou-se imprescindível o estudo desses equipamentos nos cursos técnicos, tecnológicos e de engenharias. Entretanto, laboratórios bem equipados para tais fins acabam por apresentar alto custo de implantação e manutenção. Dentro desse contexto, tem-se a proposta de desenvolver um sistema didático para ensino de conversores CC-CA com monitoramento por microcontroladores que possa suprir uma carga trifásica de até 736 W e ser utilizado como laboratório remoto. Assim para ajudar no desenvolvimento do protótipo são realizadas as seguintes etapas: revisão bibliográfica, projeto e simulação do protótipo. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos, validando o estudo realizado. Por fim, apontam-se as possibilidades de continuidade do trabalho.

Palavras-chave: Conversor CC-CA, motor elétrico, microcontrolador

ABSTRACT

Today in modern society, the electric drives are of great importance, since it is estimated that about 55% of energy consumed by the country takes place due to the use of electric motors, and industrial sectors are mainly three phase induction motors and therefore, are important for the development of society. Thus, given the wide use of electric motors in various productive sectors and domestic and the constant search for better quality products, it became imperative to study these courses in technical equipment, technology and engineering. However, well-equipped laboratories for such purposes due to its high end cost of deployment and maintenance. Within this context, there is the proposal to develop an educational system to teach DC-AC converters with monitoring by a microcontroller that can supply up to 736 W three-phase load and be used as a remote laboratory. So to help in the development of the prototype are performed the following steps: a literature review, design and simulation of the prototype. The experimental results are presented and discussed, validating the study. Finally, it was pointed out the possibility of continuing work.

Key-words: AC-DC converter, electric motor, microcontroller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Faixa de trabalho de potência e tensão para chaves s semicondutoras de potência. Fonte: BIN WU 2006.....	22
Figura 2 - Estrutura básica do inversor de tensão em ponte completa. .	24
Figura 3 - Etapas de operação.	25
Figura 4 - Principais formas de onda.	26
Figura 5 - Inversor trifásico de tensão com diodo de roda-livre com carga resistiva trifásica ligada em triangulo.....	27
Figura 6 - Pulsos de comando nas chaves do inversor tipo 180°.	29
Figura 7 - Inversor trifásico de tensão tipo 180°.....	29
Figura 8 - Principais formas de onda para o inversor 180°. Fonte: BARBI, 2009.	30
Figura 9 - Circuito de potência do inversor de tensão trifásico em ponte tipo 120°.....	31
Figura 10 - Diagrama de sequência de chaveamento do inversor de tensão trifásico em ponte tipo 120°.....	32
Figura 11 - Formas de onda das tensões de linha e pulsos de comando nas chaves para o inversor 120°. Fonte: BARBI, 2009.....	33
Figura 12 - Princípio da Modulação PWM Senoidal. Fonte: BARBI, 2009.	37
Figura 13 - Princípio da modulação PWM senoidal a três níveis. (a) Geração dos pulsos de comando; (b) Forma de onda da tensão de saída. Fonte: BARBI, 2009.	40

Figura 14 - Formas de onda da tensão de saída para um inversor trifásico de tensão tipo 180° empregando modulação PWM senoidal.	42
Figura 15 - Versão básica do Arduino. Fonte: http://www.arduino.cc , acesso em 01/2012.	44
Figura 16 - Ambiente de desenvolvimento do Arduino. Fonte: BANZI, 2008.....	46
Figura 17 - Representação de um laboratório remoto. Fonte: CASTRO, 2010.....	48
Figura 18 - Diagrama em blocos do protótipo.....	54
Figura 19 - Retificador de entrada.....	57
Figura 20 - Tensões de entrada e saída do retificador para operação com tensão de entrada mínima.	62
Figura 21 - <i>Ripple</i> da tensão de saída do retificador para operação com tensão de entrada mínima.	62
Figura 22 - Tensões de entrada e saída do retificador para operação com tensão de entrada máxima.	63
Figura 23 - <i>Ripple</i> da tensão de saída do retificador para operação com tensão de entrada máxima.	63
Figura 24 - Potência de saída do retificador.	64
Figura 25 - Ponte inversora trifásica.	65
Figura 26 – a) Correntes de linha; b) Correntes de fase.	70
Figura 27 - Tensões de saída trifásicas.....	71
Figura 28 - Potência dissipada em uma das chaves ativas.	71

Figura 29 - Fontes auxiliares.....	72
Figura 30 - Circuito de isolamento dos pulsos PWM.....	74
Figura 31 - <i>Driver</i> para acionar a ponte inversora trifásica.	76
Figura 32 - Circuitos para medição das correntes e tensão de barramento CC.....	77
Figura 33 - Tensão de saída x Corrente de entrada. Fonte: http://www.allegromicro.com , Acesso em 10/2010.....	78
Figura 34 - Faixa linear de operação do transdutor de tensão.....	79
Figura 35 - Liga/Desliga.	80
Figura 36 - Circuito de pré-carga dos capacitores de filtro do retificador.	81
Figura 37 - Face superior (<i>top</i>) da placa de potência do inversor de frequência.....	82
Figura 38 - Face inferior (<i>bottom</i>) da placa de potência do inversor de frequência.....	83
Figura 39 - Diagrama esquemático da <i>Shield</i> para o Arduino.	84
Figura 40 - Face superior (<i>top</i>) da <i>shield</i> de interface dos sinais de entrada e saída do Arduino.....	84
Figura 41 - Face inferior (<i>bottom</i>) da <i>shield</i> de interface dos sinais de entrada e saída do Arduino.....	85
Figura 42 - Fluxograma do firmware embarcado no microcontrolador.	87
Figura 43 - (a) Interface com usuário via web; (b) Interface com usuário via acesso local.	89

Figura 44 - Terminal de comunicação serial Hercules utilizada para escolha de acionamento do inversor.....	90
Figura 45 - Página web utilizada para o acesso remoto do inversor.	91
Figura 46 - Foto da bancada de experiências.	92
Figura 47 - Correntes de partida e desligamento do motor de indução.	94
Figura 48 - Correntes e tensão medidas no terminal de saída do inversor alimentando um motor de indução trifásico.	95
Figura 49 - Correntes em regime com reversão da rotação do motor. ..	96
Figura 50 - Forma de onda de corrente e tensão para uma carga resistiva monofásica.	97
Figura 51 - Diagrama esquemático do conversor CC-CA e os seus circuitos auxiliares.....	1

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de <i>hardware</i>	43
Tabela 2 - Exemplo de programa em PHP. Fonte: PHP.NET, 2005.....	50
Tabela 3 - Parâmetros para os testes com motor de indução.....	92
Tabela 4 - Parâmetros para o teste com lâmpadas.	93

ABREVIATURAS

A – Ampère

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

DC – *Direct Current*

DSP – *Digital Signal Processor*

HTML – *Hypertext Markup Language*

Hz – Hertz

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor*

LED – *Light Emitter Diode*

MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

MVC – Modelo-Visual-Controle

PHP - *Hypertext Preprocessor*

PWM – Modulação por largura de pulso

USB – *Universal Serial Bus*

V – Volt

WEB – *World Wide Web*

SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	6
LISTA DE TABELAS	10
ABREVIATURAS	11
1. INTRODUÇÃO	17
1.2 Objetivo Geral	18
1.3 Objetivos Específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Introdução	20
2.2 Evolução da Eletrônica de Potência	20
2.3 Conversores CC-CA	21
2.3.1 Tipos de conversores CC-CA	23
2.3.2 Conversores CC-CA de Tensão	23
2.3.2.1 Princípio de funcionamento dos conversores CC-CA (estrutura básica monofásica)	24
2.3.2.2 Princípio de funcionamento do conversor CC-CA estrutura trifásica	26
2.3.2.3 Conversor CC-CA trifásico tipo 180°	28
2.3.2.4 Conversor CC-CA trifásico tipo 120°	31
2.3.3 Controle de tensão de saída do inversor	34
2.3.3.1 Modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal	35
2.3.3.2 Modulação PWM senoidal a três níveis	39

2.3.3.3 Inversor de Tensão Trifásico.....	41
2.4 Arduino	42
2.4.1 <i>Hardware</i>	43
2.4.2 Software	44
2.5 Laboratório Remoto	47
2.6 PHP	49
2.6.1 PHP4	53
2.6.2 PHP5	53
3. Desenvolvimento de protótipo de laboratório.....	54
3.1 Projeto e simulação do retificador de entrada com filtro capacitivo.....	55
3.1.2 Resultados simulação do retificador para cargas resistivas:	61
3.2 Projeto da ponte inversora trifásica.....	64
3.2.1 Resultados simulação da ponte inversora trifásica para carga resistiva:	70
3.3 Propostas do circuito de Comando e Controle.....	72
3.3.2 Circuito de foto isolamento	73
3.3.3 Circuito de acionamento dos IGBTs	75
3.3.4 Sensores de corrente.....	77
3.3.5 Sensor de tensão.....	78
3.3.6 Circuito de Liga/Desliga do estágio de potência.....	80
3.3.7 Circuito de pré-carga dos capacitores de filtro do retificador	81
3.4 Leiautes das placas utilizadas no projeto	81
3.4.1 Leiaute da placa do inversor de frequência.....	82
3.4.2 Leiaute da Shield para Arduino	83
3.5 <i>Firmware</i> embarcado	85

3.6 Interface com o usuário	88
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	92
5. CONCLUSÃO	98
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE	102
APÊNDICE A – Definições gerais do <i>firmware</i> para o Atmega168 ..	103
APÊNDICE B – Cabeçalho e definições de variáveis e constantes	104
APÊNDICE C – Configuração dos Timers para a geração das saídas PWM	106
APÊNDICE D – Configuração da USART do Atmega168	108
APÊNDICE E – Funções chamadas no laço principal	110
APÊNDICE F – Laço principal do <i>firmware</i> para o Atmega168	112
APÊNDICE G – Código em PHP para comunicação via WEB	115
APÊNDICE H – Código em HTML para apresentação do site	121
APÊNDICE I – Diagrama esquemático do circuito de potência e seus circuitos auxiliares.....	1

1. INTRODUÇÃO

A forte presença dos motores elétricos no cotidiano da sociedade demonstra o importante papel que eles exercem dentro da mesma. Tal presença pode ser notada em residências (eletrodomésticos, ventiladores, portões elétricos,...), nos escritórios e escolas (elevadores, condicionadores de ar, máquinas copiadoras...) quanto nas grandes e pequenas indústrias (bombas, compressores, misturadores, esteiras transportadoras,...). Estima-se que de tão numerosos eles consomem cerca de 55% de toda a energia elétrica produzida em nosso país e, portanto, são importantes para o balanço energético e desenvolvimento de qualquer sociedade. [PORTO, 2002]

Assim, por apresentar tal importância na sociedade moderna, torna-se imprescindível o estudo das máquinas elétricas no currículo de cursos de Engenharia Elétrica, Mecânica, Mecatrônica e de áreas afins. Em todas elas, a grade curricular contempla diversas disciplinas como Eletromagnetismo, Conversão de Energia e Máquinas Elétricas especificamente, que são disciplinas ligadas ao estudo de grandezas e fenômenos que justificam a operação destes dispositivos. Os diversos conceitos envolvidos necessitam de um complexo tratamento matemático, além de demandar grande nível de abstração. Dessa forma, o ensino das máquinas elétricas e suas variações (motores, geradores, transformadores,...) precisam de bons materiais didáticos para que as disciplinas possam ser mais bem compreendidas pelos alunos.

Em cursos de nível técnico e superior, a existência de laboratórios didáticos para máquinas elétricas é primordial, uma vez que auxilia na exemplificação e assimilação dos conceitos inerentes ao tema, permitindo que o aluno vivencie parte importante da teoria desenvolvida. Em contra partida a ausência de laboratório torna o estudo dispendioso e pouco produtivo, com baixos índices de assimilação.

Outro problema inerente à área de eletricidade é o elevado nível de atualização, introduzindo no mercado dispositivos e equipamentos com novas tecnologias em uma velocidade crescente [FITZGERALD, 2007]. Como exemplos das novas tecnologias introduzidas recentemente estão: telefone celular, aparelhos DVD, blue ray, televisão de alta definição, entre outros. Em todas elas existem pequenos motores que

executam as mais variadas tarefas sem que usuário perceba sua presença.

Esta constante evolução da área citada aumenta a procura dos profissionais de eletricidade por cursos de educação continuada, além de tornar os laboratórios obsoletos rapidamente e exigir constantes investimentos.

Mesmo com alguns atrativos, os laboratórios virtuais não atendem por completo às necessidades didáticas dos cursos de engenharia e afins, além de atualmente representarem uma alternativa intermediária entre o real e o virtual, com custos que podem ser diluídos entre um maior número de usuários e instituições envolvidas. Em laboratórios remotos, os experimentos acontecem em um ambiente controlado e monitorado por um computador local (servidor), que pode ser manuseado ou não por um usuário que está em local distinto realizando o experimento de um computador remoto, obtendo dados e imagens do sistema em estudo. Tais laboratórios são comumente encontrados na área de física e eletrônica, porém ainda são pouco utilizados em eletrônica de potência. [CASTRO, 2010]

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho propõe estudar e implementar uma plataforma didática para o aprendizado do comando, controle e funcionamento de conversores CC-CA com saída monofásica e saída trifásica. Assim, seu objetivo geral é realizar o estudo e implementação de uma plataforma de experimentação didática para o estudo dos conversores CC-CA com baixo custo, acesso remoto e possibilidade de se adaptar a qualquer família de microcontroladores.

1.3 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Propor e implementar uma plataforma de experimentação remota de baixo.
- Medir e monitorar as grandezas envolvidas através de microcontroladores.
- Possibilitar a utilização das mais variadas famílias de microcontroladores e DSP's na programação do controle e comando da plataforma.
- Possibilitar o acesso remoto da plataforma via internet para que, tanto os alunos quanto professores possam fazer as experiências a distância.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo tem-se por objetivo fazer um breve estudo sobre os temas necessários para a composição deste trabalho. Inicialmente é feito um resumo sobre a evolução na eletrônica de potência para depois entrarmos no estudo sobre conversores CC-CA que é a base para a compreensão do estágio de potência do protótipo. Após o estudo sobre a parcela do trabalho correspondente à eletrônica de potência é dado início ao estudo do Arduino utilizado para o controle e monitoramento do conversor CC-CA. Logo após a revisão para a base do projeto de potência e controle do conversor é feito um estudo resumido sobre laboratórios remotos e linguagem de programação PHP que faz-se necessário para a base do monitoramento e acesso remoto do protótipo.

2.2 Evolução da Eletrônica de Potência

A Eletrônica de Potência pode ser definida como uma ciência aplicada que nasceu a partir da necessidade do acionamento de máquinas elétricas de alta potência, através de simples e pequenos sistemas eletrônicos. No transcorrer dos anos, deu-se origem a outras ramificações dessa ciência, atualmente alcançando desempenhos que permitem sua aplicação em várias áreas da Engenharia Elétrica. Sua rápida ascensão se deve principalmente ao progresso crescente dos semicondutores de potência, principalmente constituídos por chaves estáticas; principais dispositivos para o comando dos conversores estáticos. Os conversores estáticos permitem a conversão e o controle da energia elétrica em altos níveis de potência. Concorrentemente houve o desenvolvimento dos circuitos integrados, dedicados a operação de chaveamento dos conversores estáticos, para aplicações específicas, os quais também tem contribuído muito para o desenvolvimento da Eletrônica de Potência [BOSE, 2003]. Atualmente os componentes

discretos envolvidos na operação dos conversores estáticos têm sido substituídos por módulos dedicados que unem tanto as chaves estáticas de potência quanto os circuitos de controle das mesmas, chegando ao ponto de se ter módulos de controle de motores de indução com microcontroladores inclusos no mesmo encapsulamento. Essa constante evolução da integração dos circuitos envolvidos tem melhorado o desempenho das topologias em Eletrônica de Potência, tornando-as mais compactas e eficientes. As aplicações dos microprocessadores na estratégia de controle para o comando das chaves estáticas de potência, visando alcançar às especificações da conversão de energia, estão ampliando ainda mais as áreas de atividade da Eletrônica de Potência. [BARBI, 2009]

Outra importante constatação na evolução da Eletrônica de Potência mostra que a mesma tem progressivamente substituído os métodos tradicionais de conversão de energia e controle, causando o que pode ser chamado como uma revolução tecnológica na área de sistemas de energia, tais como: fontes de alimentação reguladas, acionamentos elétricos em corrente contínua e alternada, obtenção de barramentos de corrente contínua a partir de fontes de tensão alternada, transmissão de energia elétrica em corrente contínua, tratamento e processamento de energia obtida por fontes renováveis do tipo fotovoltaica e/ ou eólica, e assim por diante. [BARBI, 2009]

2.3 Conversores CC-CA

Os conversores CC-CA normalmente chamados de “inversores de frequência” tem como principal função converter uma fonte contínua (de tensão ou de corrente) aplicada à sua entrada em uma fonte alternada (de tensão ou de corrente) na saída do conversor. Tendo como requisitos básicos: valor médio nulo e simetria na amplitude.

Os níveis de tensão ou de corrente de saída podem ser fixos ou variáveis, assim como a sua frequência de operação.

As formas de onda na saída dos inversores são normalmente retangulares apresentando alto conteúdo harmônico. Para determinadas aplicações esse tipo de forma de onda pode ser aceitável. Contudo, em

muitos casos desejam-se formas de onda senoidais com baixo conteúdo harmônico.

Felizmente, com o desenvolvimento atual dos dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, o conteúdo harmônico das formas de onda de saída dos conversores CC-CA pode ser minimizado, e em muitos casos reduzido significativamente, utilizando técnicas específicas de modulação e filtragem.

Segundo [BARBI, 2009] as chaves estáticas semicondutoras mais utilizadas em circuitos inversores são: BJTs, MOSFETs, IGBTs e GTOs. Todas essas chaves estáticas são controladas tanto na entrada em condução como no bloqueio, sendo que as duas últimas são recomendadas para potências elevadas. A Figura 1 apresenta o gráfico com as faixas de potência e tensão onde são empregadas as chaves semicondutoras de potência supracitadas.

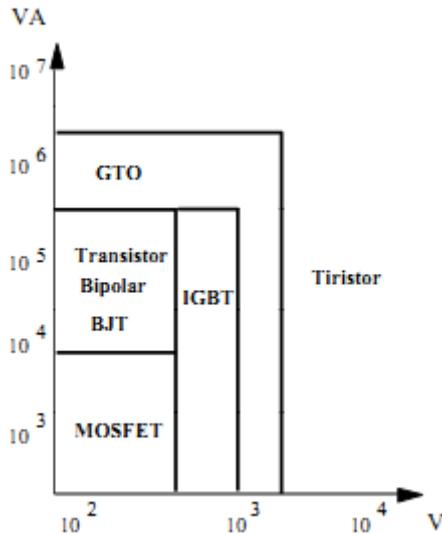


Figura 1 - Faixa de trabalho de potência e tensão para chaves s semicondutoras de potência. Fonte: BIN WU, 2006.

Conforme apresentando na Figura 1 pode-se dizer que em eletrônica de potência a faixa das potências elevadas começa em 1 MW.

2.3.1 Tipos de conversores CC-CA

Os conversores estáticos CC-CA podem ser classificados entre as seguintes categorias, dependendo do tipo de fonte alternada que se deseja na saída:

- Conversores CC-CA de tensão.
- Conversores CC-CA de corrente.
- Conversores CC-CA regulado em corrente.
- Conversores CC-CA de fase controlada.

Entre esses conversores, o de fase controlada é o único incapaz de gerar uma fonte alternada independente. Na realidade ele serve como interface de processamento de energia entre uma fonte CC e uma fonte CA já existente. Ele na realidade é um retificador de fase controlada operando no modo inversor, ou seja, com o sentido de fluxo de energia reverso [BARBI, 2001].

2.3.2 Conversores CC-CA de Tensão

É o mais comum dos tipos de conversores CC-CA. O sinal alternado gerado na saída comporta-se como uma fonte de tensão alternada, com valor médio nulo. A tensão contínua na entrada pode ser originada a partir da saída de um retificador alimentado pela rede elétrica CA. Neste caso ele é comumente denominado na literatura internacional de “DC link inverter” [BARBI, 2001]. Em outros casos, a tensão contínua de entrada pode ser originada a partir de uma fonte independente, como por exemplo, um banco de baterias ou um conjunto de painéis solares fotovoltaicos.

Dentre as aplicações deste tipo de conversor pode-se destacar: controle de velocidade de máquinas elétricas de corrente alternada, sistemas de alimentação ininterrupta de energia (UPS's), aquecimento indutivo, fontes de alimentação para aeronaves, etc.

2.3.2.1 Princípio de funcionamento dos conversores CC-CA (estrutura básica monofásica)

Para apresentação do princípio de funcionamento dos conversores CC-CA será utilizada a estrutura do inversor monofásico de tensão na configuração em ponte completa representada na Figura 2, onde S_1 , S_2 , S_3 e S_4 são chaves estáticas comandadas, R é a resistência de carga e L sua indutância e E representa a fonte contínua de alimentação.

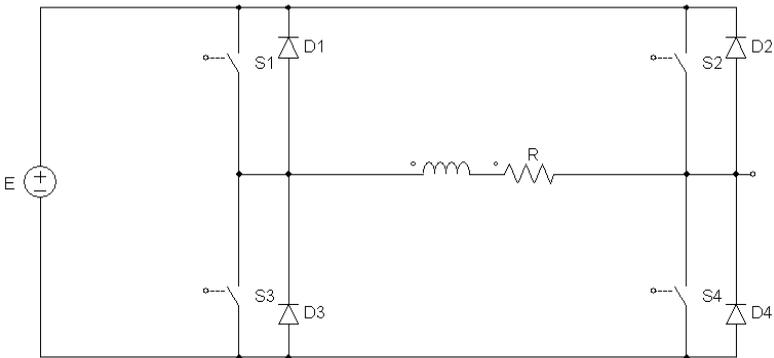


Figura 2 - Estrutura básica do inversor de tensão em ponte completa.

Conforme apresentado na Figura 3 têm-se as seguintes etapas de operação:

1ª Etapa (Figura 3a): As chaves S_1 , S_4 conduzem a corrente de carga. A tensão na carga é igual a $+E$. Durante esta etapa a fonte de alimentação E entrega energia à carga RL e S_2 , S_3 estão bloqueadas. A tensão nos terminais da resistência de carga RL é $+E$. A corrente i_o cresce exponencialmente.

2ª Etapa (Figura 3b): Em $t=T/2$ as chaves S_1 , S_4 são bloqueadas, provocando a imediata condução dos diodos D_2 , D_3 . Esta etapa é denominada de etapa de roda-livre. A tensão é $-E$. A corrente i_o decresce exponencialmente.

3ª Etapa (Figura 3c): Quando a corrente i_o se anula as chaves S_2, S_3 entram em condução. A corrente i_o cresce exponencialmente em sentido contrário ao da primeira etapa. A tensão na carga continua sendo $-E$. Nesta etapa a fonte de alimentação E entrega energia à carga, mas com polaridade de tensão invertida.

4ª Etapa (Figura 3d): Em $t = T$ as chaves S_2, S_3 são bloqueadas, provocando a imediata condução dos diodos D_1, D_4 . A corrente de carga i_o decresce exponencialmente. A tensão na carga é agora igual a $+E$. Esta etapa é também denominada etapa de roda-livre, ela finaliza com a anulação da corrente i_o e a entrada em condução das chaves S_1, S_4 , reiniciando a primeira etapa.

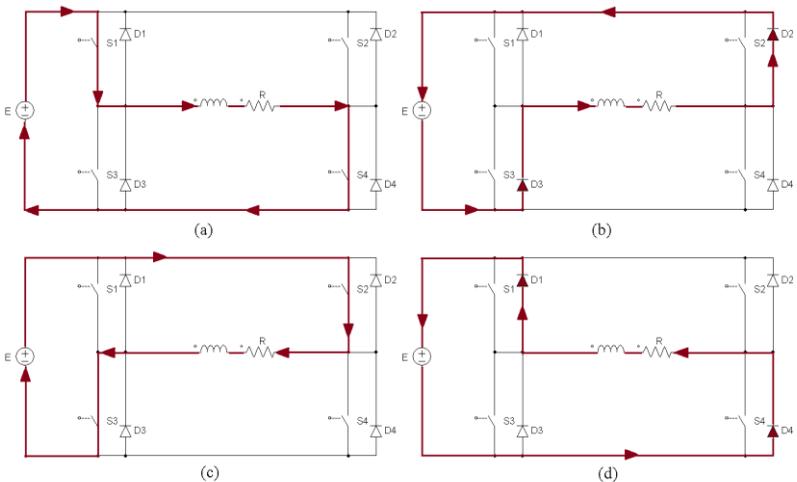


Figura 3 - Etapas de operação.

A duração das duas etapas principais, mostradas na Figura 3, é exatamente a mesma, gerando nos terminais da carga uma tensão alternada de valor médio nulo e que oscila entre $+E$ e $-E$.

Principais formas de onda:

As principais formas de onda são apresentadas na Figura 4. Uma vez que a carga tem características indutivas, então a forma de onda da corrente difere do formato da tensão, onde a corrente cresce

exponencialmente até o intervalo $T/2$ e a partir da transição da tensão E para tensão $-E$ a corrente passa a decrescer de forma exponencial.

Assim como a carga tem características indutivas, devem ser acrescentados quatro diodos em antiparalelo com cada chave comandada, para permitir um caminho alternativo para a corrente de carga no momento da abertura das chaves, conforme mostrado na Figura 4.

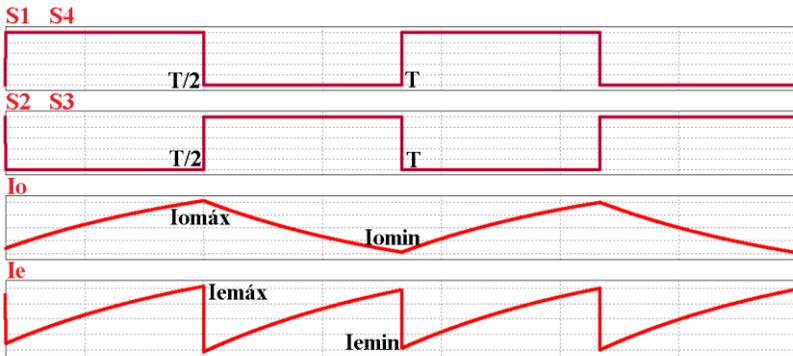


Figura 4 - Principais formas de onda.

2.3.2.2 Princípio de funcionamento do conversor CC-CA estrutura trifásica.

O conversor CC-CA trifásico de tensão, com forma de onda retangular na saída, é uma das estruturas mais empregadas na indústria, é normalmente aplicado em altas potências. Sua popularidade deve-se em princípio pelo fato de ser um eficiente meio de se obter tensões trifásicas com frequência controlável.

A estrutura básica do inversor trifásico de tensão é apresentada na Figura 5. Para cargas indutivas faz-se necessário à adição de seis diodos colocados em anti-paralelo com cada chave comandada, gerando um interruptor bidirecional em corrente, que permite a circulação de corrente durante a abertura das chaves. Esses diodos desempenham o papel de roda-livre para a circulação da corrente de carga, onde cada

braço representa uma fase do sistema estático trifásico, que é conectado à carga trifásica. A carga trifásica alimentada por esse sistema é em geral balanceada.

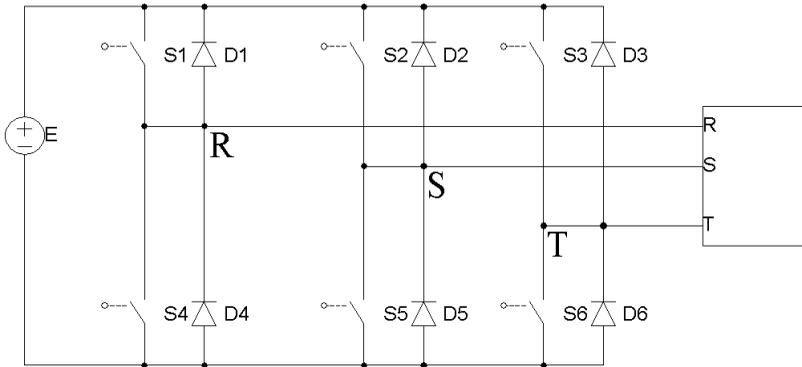


Figura 5 - Inversor trifásico de tensão com diodo de roda-livre com carga resistiva trifásica ligada em triângulo.

O funcionamento básico do inversor trifásico é essencialmente o mesmo do inversor monofásico em ponte. Para se conseguir o efeito de fonte trifásica, cada terminal de saída de cada braço inversor é conectado alternadamente, a cada meio período, no terminal positivo e negativo da fonte de alimentação CC. A tensão de saída trifásica é obtida preservando um ângulo de defasagem de 120° entre as sequências de chaveamento de cada braço inversor. Desse modo, tem-se para cada braço inversor, uma tensão de saída que se encontra 120° atrasada em relação ao braço inversor chaveado anteriormente, e 120° adiantada em relação ao braço inversor chaveado posteriormente, de forma a se produzir o mesmo comportamento dos sistemas trifásicos convencionais [RASHID, 1999].

O inversor trifásico de tensão em ponte apresenta dois tipos de operação. O tipo 180° , onde cada chave comandada conduz por 180° , e o tipo 120° , aonde cada chave conduz por apenas 120° de cada semi-período. O tipo 180° é em geral o mais empregado por dois motivos: 1º) as chaves semicondutoras são melhor aproveitadas quando operam conduzindo em 180° , e 2º) no tipo 180° a forma de onda da tensão de saída não é afetada pela natureza da carga [RASHID, 1999].

2.3.2.3 Conversor CC-CA trifásico tipo 180°

Neste caso cada chave comandada é mantida em condução durante 180°. Os comandos das chaves das duas chaves de um mesmo braço inversor são complementares. Os comandos das chaves de um braço estão defasados de 120° em relação aos comandos das chaves do braço vizinho. A partir dessa estratégia de comando a tensão de saída é imposta a todo instante, qualquer que seja a natureza da carga.

A estrutura de potência do inversor trifásico tipo 180° é a mesma apresentada na Figura 5, onde de acordo com Figura 1 as chaves comandadas (S_1 - S_6) podem ser tiristores ou GTOS (para altas potências – na faixa do MW), ou tiristores (Bipolar, Mosfet ou IGBT – para baixas e médias potências). Em aplicações onde, pelo nível de potência, se exige o uso de tiristores, estes devem ser acompanhados de seus respectivos circuitos de comutação forçada. A carga pode ser ligada em estrela (Y) ou em triângulo (Δ) [RASHID, 1999].

Sequência de funcionamento:

Segundo [RASHID, 1999] o inversor trifásico de tensão em ponte da Figura 5 é, de fato, a composição de três inversores monofásicos de meia ponte. No braço R, para o primeiro semi-período, a chave S_1 permanece em condução, enquanto S_4 fica bloqueada. Já no semi-período seguinte há uma inversão no comando das chaves, e assim S_1 permanece aberta, enquanto S_4 mantém-se conduzindo. As chaves do braço S operam da mesma maneira, exceto pelo fato que o comando das mesmas está defasado de 120°, ou seja, 1/3 de período, em relação ao braço R. Operação similar ocorre com o braço T, sendo que o comando das chaves desse braço está defasado de 120° em relação ao braço S. Desse modo, as chaves semicondutoras são comandadas segundo o diagrama na Figura 6. A Figura 7 mostra o inversor de frequência trifásico com dois capacitores formando um ponto médio para a obtenção das formas de ondas apresentadas na Figura 8.

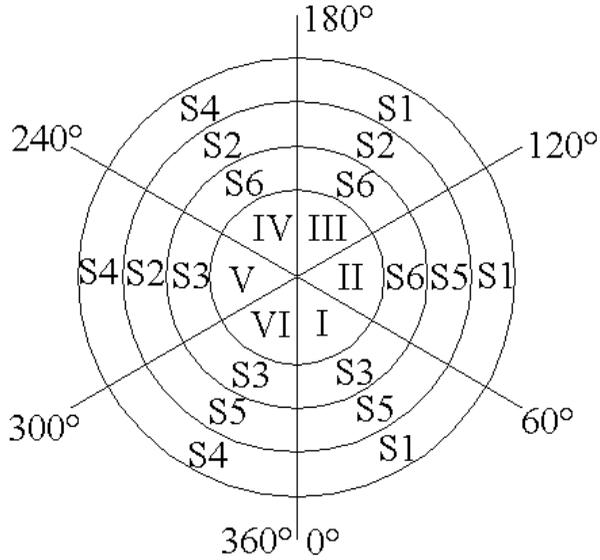


Figura 6 - Pulsos de comando nas chaves do inversor tipo 180°.

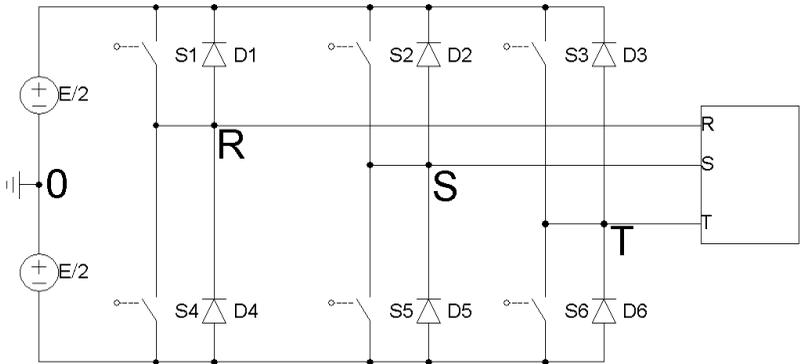


Figura 7 - Inversor trifásico de tensão tipo 180°.

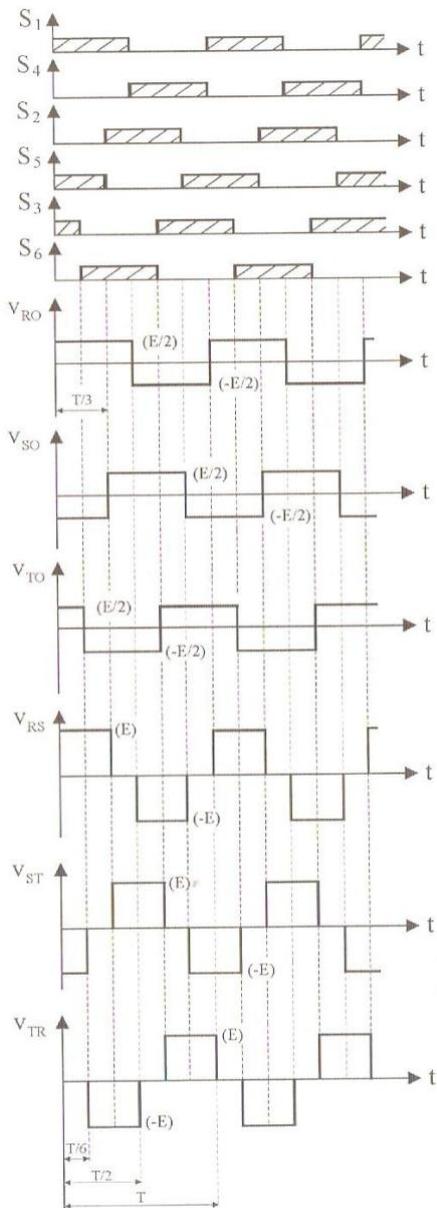


Figura 8 - Principais formas de onda para o inversor 180°. Fonte: BARBI, 2009.

2.3.2.4 Conversor CC-CA trifásico tipo 120°

Este modo de operação não é tão empregado como o tipo 180°. A estrutura de potência é a mesma do inversor trifásico tipo 180°, com a única diferença que cada chave controlada conduz por apenas 1/3 do período de operação do conversor, ou seja, 120°. Desse modo, há um intervalo de 60° entre os comandos de duas chaves controladas pertencentes a um mesmo braço do inversor. Por conseguinte, em qualquer instante de tempo somente duas chaves controladas estarão conduzindo, uma do grupo positivo (S_1, S_2, S_3) e outra do grupo negativo (S_4, S_5, S_6). Os comandos das chaves controladas de um dado braço são defasados de 120° em relação aos comandos dos braços vizinhos [RASHID, 1999].

Sequência de funcionamento:

Há seis sequências de operação em um período da forma de onda da tensão alternada de saída. Em cada sequência duas chaves controladas permanecem em condução, conectando dois dos terminais da carga aos terminais da fonte de alimentação CC, enquanto o terceiro terminal permanece flutuando.

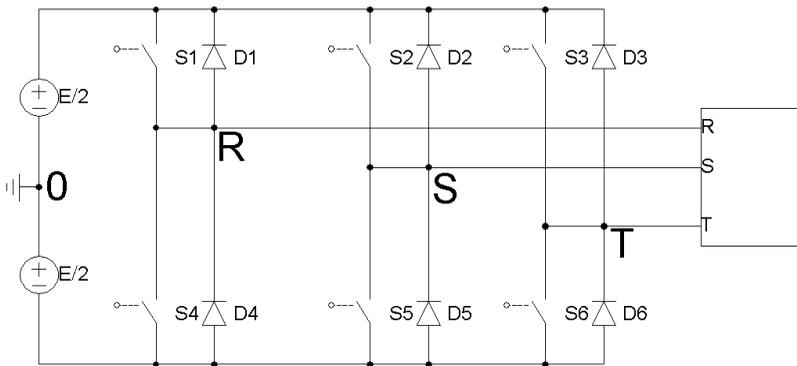


Figura 9 - Circuito de potência do inversor de tensão trifásico em ponte tipo 120°.

A cada intervalo de 60° uma chave controlada é colocada em condução, obedecendo a uma sequência apropriada a fim de gerar um

sistema de tensões trifásicas balanceadas defasadas de 120° . A frequência de chaveamento define a frequência da tensão de saída. A Figura 10 apresenta, na forma de diagrama, a sequência de chaveamento do inversor trifásico de tensão em ponte tipo 120° representado na Figura 9.

Verifica-se pelo diagrama de sequência de chaveamento da Figura 10 que a possibilidade de curto-circuito neste modo de operação é muito remota, dado o fato que há um intervalo relativamente grande de $T/6$, ou seja, 60° entre a ordem de bloqueio de uma chave e a ordem de entrada em condução da outra chave, ambas pertencentes ao mesmo braço inversor. Essa característica representa uma grande vantagem deste tipo de controle. Como cada chave controlada conduz por apenas 120° elas são, portanto, menos utilizadas quando comparadas com as do inversor tipo 180° . Essa técnica representa um meio simples de redução da tensão na carga sem alterar a tensão de entrada. Na Figura 10 é apresentado o diagrama de comandos das chaves estáticas e a Figura 10 mostra as formas de onda do inversor.

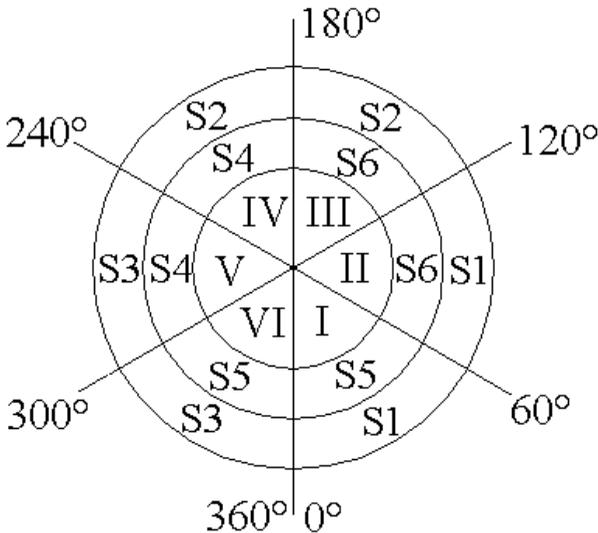


Figura 10 - Diagrama de sequência de chaveamento do inversor de tensão trifásico em ponte tipo 120° .

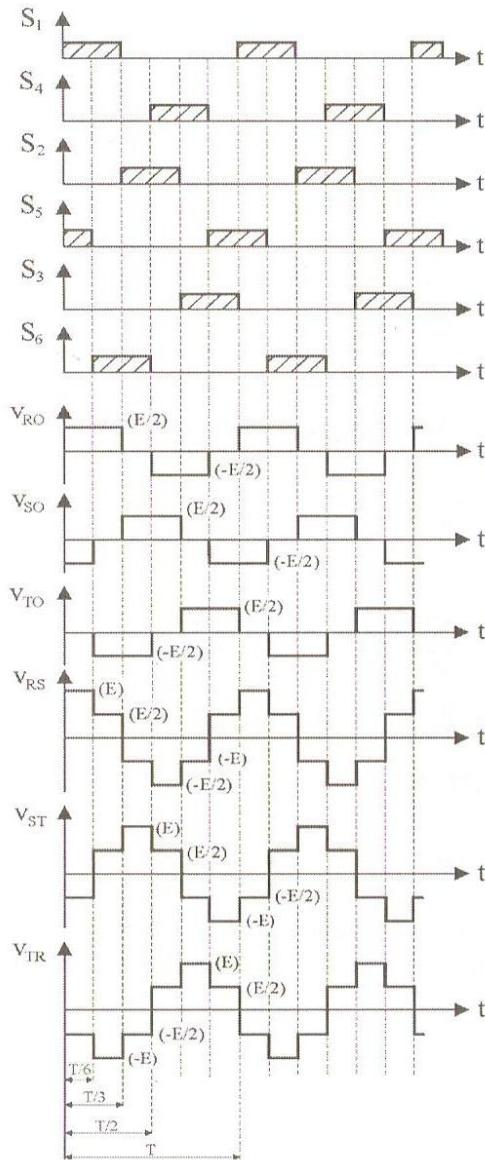


Figura 11 - Formas de onda das tensões de linha e pulsos de comando nas chaves para o inversor 120°. Fonte: BARBI, 2009.

2.3.3 Controle de tensão de saída do inversor

Normalmente, quando se utiliza um conversor CC-CA de tensão, intenciona-se controlar ou regular a tensão de saída aplicada a carga. Pode-se citar como exemplo o caso de se querer controlar a alimentação de um motor de indução trifásico onde se deseja variar a frequência para o ajuste da velocidade, deve-se então variar a tensão de forma a manter constante o fluxo no entreferro. Já no caso da alimentação de cargas críticas a partir de baterias, onde as variações paramétricas da bateria e as variações paramétricas do próprio circuito inversor alteram a tensão de saída, necessitando da sua regulação.

Os diversos métodos utilizados a fim de controlar ou regular a tensão de saída do conversor podem ser agrupados da seguinte forma:

- Controle da tensão na entrada do inversor.
- Controle da tensão dentro do inversor por modulação ou por defasagem.
- Controle da tensão na saída do inversor.

Segundo [BARBI, 2009] o controle da tensão de saída do inversor é dificilmente utilizado, pela sua complexidade e por gerar um conteúdo harmônico maior aplicado à carga. Já o controle da tensão na entrada é comumente utilizado, e para isso podem-se empregar os seguintes métodos levando em consideração o tipo de fonte, isto é:

- Quando se trata de uma bateria ou barramento CC, emprega-se um conversor CC-CC.
- Quando se trata da rede alternada comercial, geralmente emprega-se um retificador controlado.

Atualmente o método mais eficiente de controle da tensão nos conversores CC-CA de tensão consiste em incorporar o controle por modulação ou defasagem dentro do circuito inversor. O conhecimento e o avanço desse tipo de técnica têm evoluído muito nas últimas décadas e, embora mais complexo de ser implementado e assimilado, tem sido

cada vez mais empregado, razão pela qual este item será integralmente dedicado ao estudo e análise desse método.

De uma forma bem ampla, pode-se dizer que o controle da tensão de saída através das técnicas de modulação ou defasagem é efetuado por meio do ajuste do intervalo de condução das chaves estáticas controladas, em relação ao período de comutação. Por essa razão utiliza-se genericamente o termo modulação PWM (Modulação por Largura de Pulso) para a maioria dos controles da tensão realizados dentro do circuito inversor. As técnicas comumente utilizadas são:

- Controle da tensão por defasagem.
- Modulação por largura de pulsos múltiplos e iguais entre si.
- Modulação por largura de pulsos múltiplos selecionados.
- Modulação por largura de pulso senoidal.

A seguir a técnica de modulação PWM senoidal será abordada com detalhes, pois com a evolução dos microcontroladores e devido a natureza das cargas usadas no projeto ela foi escolhida para implementação.

2.3.3.1 Modulação por largura de pulsos (PWM) senoidal

É possível reduzir, de forma expressiva, o fator de distorção e as componentes harmônicas de mais baixa ordem da tensão gerada por um inversor, utilizando-se a modulação PWM senoidal ao invés da modulação PWM linear. O princípio desse tipo de modulação (PWM senoidal) está apresentado na Figura 12. Ele se baseia na comparação de uma onda de referência senoidal (onda moduladora) de baixa frequência ($f=1/T$) com uma onda triangular (onda portadora) de alta frequência ($f_p=1/T_p$). A intersecção dessas formas de onda estabelece a duração dos sinais de comando das chaves estáticas controladas. Desse modo, a variação da amplitude da onda senoidal propicia a variação dos pulsos da tensão de carga, que seguem naturalmente uma lei senoidal. Em cada semi-período a largura dos pulsos é máxima na parte central; a partir do

centro a largura dos pulsos decresce para ambos os lados segundo uma função senoidal, conforme representado na Figura 12.

A frequência da onda moduladora senoidal define a frequência da componente fundamental da tensão de saída, enquanto que a frequência da onda portadora triangular define a frequência de comutação das chaves estáticas. A tensão de saída, que é aplicada à carga, é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC de entrada (E).

Segundo a Figura 12, as duas formas de onda são sincronizadas, de modo que a relação entre as duas frequências seja um número inteiro N (número de pulsos por semi-período), representado pela expressão

(1), onde $mf = \frac{f_p}{f}$, assim a razão da frequência de modulação é definida como:

$$N = \frac{T}{2T_p} = \frac{f_p}{2f} = \frac{mf}{2}$$

(1)

Assim, aumentando-se a frequência da onda portadora triangular aumenta-se mf e, conseqüentemente a frequência de chaveamento (comutação). Isso permite deslocar as componentes harmônicas para frequências mais elevadas, facilitando a sua filtragem. Diante dessa colocação é de se esperar que, do ponto de vista teórico, não haja limites no aumento da frequência da onda triangular, de modo a se obter um número de pulsos elevados na tensão de saída antes da filtragem; contudo, nas estruturas reais esse número de pulsos está limitado pela máxima frequência de comutação das chaves semicondutoras. A desvantagem do aumento da frequência de chaveamento consiste no aumento das perdas por comutação do conversor, que devem ser avaliadas com muita prudência.

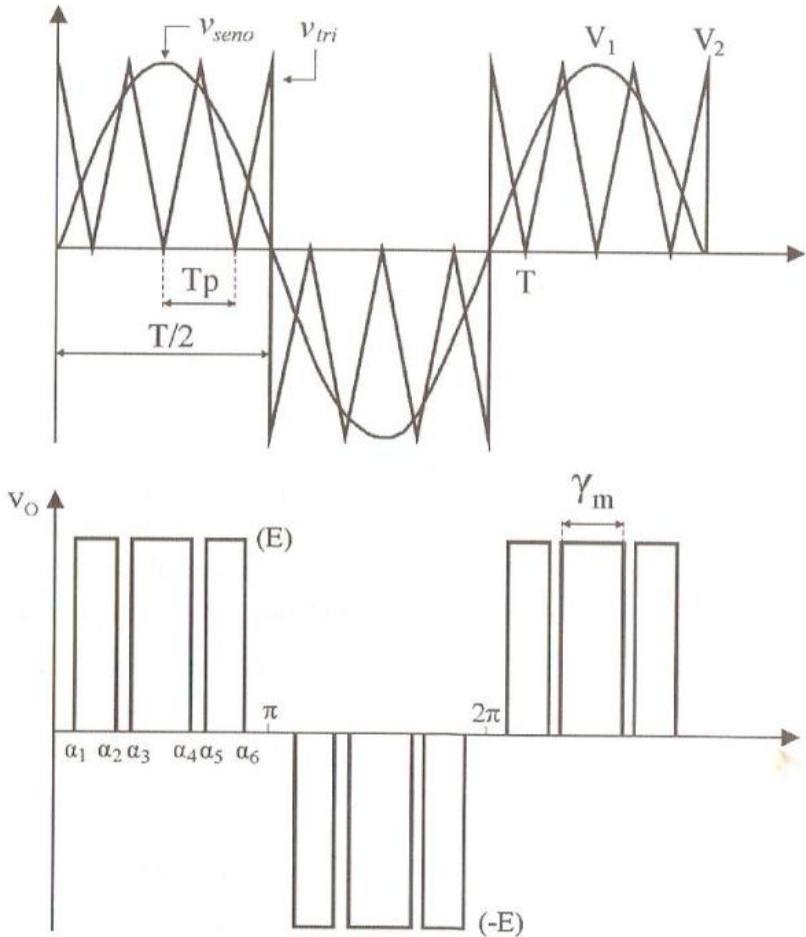


Figura 12 - Princípio da Modulação PWM Senoidal. Fonte: BARBI, 2009.

Segundo [BARBI, 2009] o índice de modulação é a relação entre V_1 e V_2 , onde V_1 é a amplitude de tensão da senóide fundamental de referencia e V_2 é a amplitude de tensão da portadora triangular.

$$m = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

Normalmente V_2 é mantida constante e V_1 pode ser variável. Logo, o parâmetro m pode variar de zero a um. Se $m \leq 1$, a amplitude e o valor eficaz da componente fundamental da tensão de saída apresentam uma relação linear com o índice de modulação, isto é:

$$V_{O1m\acute{a}x} = m \times E \quad (3)$$

$$V_{O1ef} = \frac{V_{O1m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Portanto, a amplitude e, conseqüentemente, o valor eficaz da componente fundamental da tensão de saída são controlados através do parâmetro m . Essa característica é particularmente interessante no caso da fonte de alimentação CC de entrada não ser controlada, pois assim o parâmetro m pode ser ajustado de modo a compensar as variações na fonte de entrada E , produzindo uma tensão de saída com amplitude constante. Alternativamente, o parâmetro m pode ser controlado de forma a variar a amplitude da tensão de saída.

De tudo o que foi apresentado até o presente momento conclui-se que a modulação PWM senoidal tem como função principal atenuar as harmônicas de baixa ordem que são difíceis de serem filtradas, além de regular a frequência e a tensão (ou corrente) de carga.

Há dois tipos básicos de modulação PWM senoidal; (1ª) a modulação PWM senoidal a dois níveis e (2ª) a modulação PWM senoidal a três níveis. Entretanto, existem diversas variações para a modulação PWM senoidal. A seguir a modulação PWM a três níveis e a

modulação PWM para inversores trifásicos serão discutidas devido ao fato de terem sido usadas no projeto.

2.3.3.2 Modulação PWM senoidal a três níveis

Na Figura 13 é representada a modulação PWM senoidal a três níveis. Os sinais de comando são obtidos a partir da intersecção de duas ondas moduladas senoidais de mesma amplitude e frequência, mas defasada de 180° uma da outra, com uma onda portadora triangular. Assim, o comando das chaves S_1, S_3 (instantes de disparo e bloqueio na Figura 2) é obtido comparando a onda portadora triangular v_{tri} com a onda moduladora senoidal v_{seno1} . Já o comando das chaves S_2, S_4 é obtido através da comparação de v_{tri} com a moduladora senoidal complementar v_{seno2} . Observa-se, desse modo, que a tensão de saída resultante v_o é composta de um conjunto de pulsos retangulares que segue uma função senoidal, e cujos valores se encontram entre os seguintes: +E; zero; -E. Por esse motivo, esta técnica de modulação é conhecida como modulação PWM senoidal a três níveis.

A grande vantagem deste tipo de modulação reside no fato de que o número de pulsos por semiperíodo gerado na modulação a três níveis é o dobro, se comparado à modulação a dois níveis, mantendo-se a mesma frequência de comutação das chaves semicondutoras. Como resultado, os primeiros harmônicos da tensão de saída modulada a três níveis estão em uma ordem de frequência duas vezes superior, distanciando-se da frequência do termo fundamental. Isso possibilita o uso de filtros de saída com frequência de corte mais elevada, o que implica em redução de volume e peso. Como inconveniente essa modulação necessita de um circuito de comando e controle mais elaborado; e não pode ser aplicada em estruturas em meia ponte.

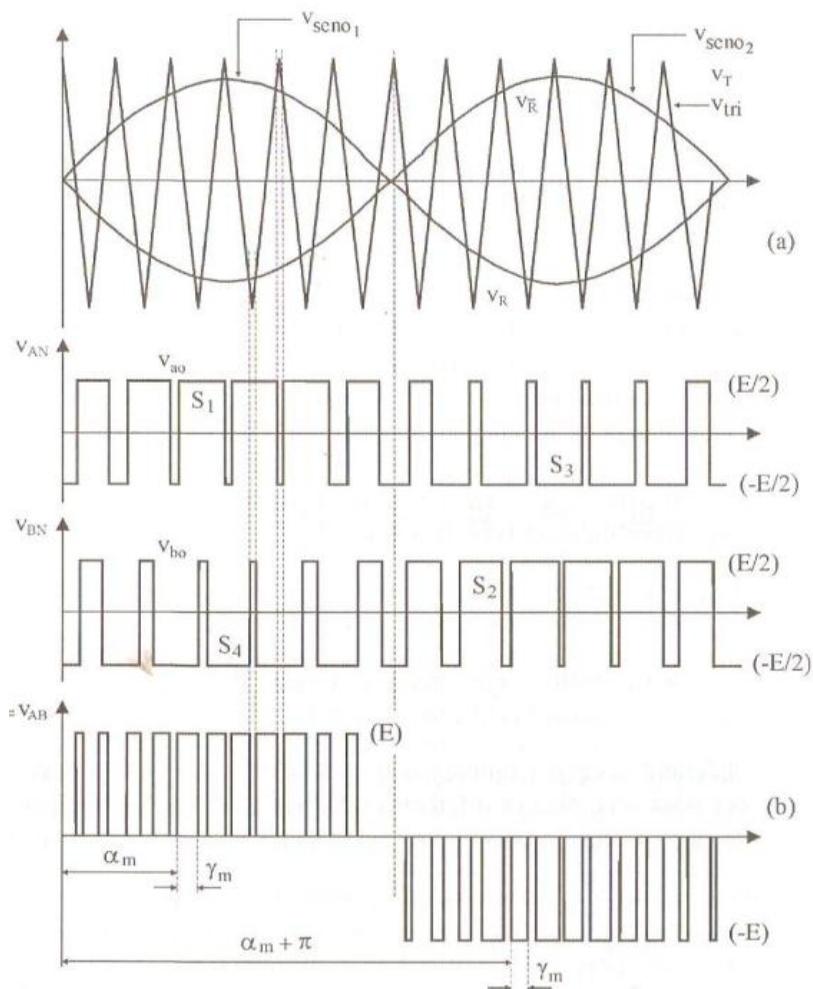


Figura 13 - Princípio da modulação PWM senoidal a três níveis. (a) Geração dos pulsos de comando; (b) Forma de onda da tensão de saída. Fonte: BARBI, 2009.

2.3.3.3 Inversor de Tensão Trifásico

A técnica de modulação PWM senoidal, descrita para os inversores monofásicos, também pode ser aplicada aos inversores trifásicos. A estrutura de potência do inversor trifásico apresentado é a da Figura 5. As ordens de comando das chaves estáticas são estabelecidas através da comparação de três ondas moduladoras senoidais (uma para cada braço do circuito inversor trifásico), defasadas entre si de 120° , com uma onda portadora triangular, conforme está representado na Figura 14. Não há diferença na frequência ou na amplitude das três ondas moduladoras senoidais.

Há exemplo dos inversores monofásicos, a frequência da onda moduladora senoidal define a frequência da componente fundamental da tensão de saída, e a frequência da onda portadora triangular estabelece a frequência de chaveamento das chaves estáticas. A amplitude da tensão trifásica de saída é controlada pela variação da amplitude das ondas moduladoras senoidais em relação à onda portadora triangular, o que permite variar o índice de modulação M . Essa variação altera a largura dos pulsos da forma de onda da tensão de saída preservando o padrão de modulação senoidal.

Uma possível estratégia de comando das chaves estáticas é apresentada a seguir; sempre lembrando que as duas chaves pertencentes a um mesmo braço inversor não podem estar conduzindo ao mesmo tempo.

Se $v_{Rseno} > v_{tri}$, então S_1 em condução.

Se $v_{Rseno} < v_{tri}$, então S_4 em condução.

Se $v_{Sseno} > v_{tri}$, então S_2 em condução.

Se $v_{Sseno} < v_{tri}$, então S_5 em condução.

Se $v_{Tseno} > v_{tri}$, então S_3 em condução.

Se $v_{Tseno} < v_{tri}$, então S_6 em condução.

Logo, a partir da estratégia de controle descrita e analisando a Figura 14 verifica-se que o sinal de comando enviado a cada braço do inversor é do tipo dois níveis. Desse modo, a tensão de fase apresenta-se em dois níveis, enquanto que a tensão de linha (entre duas faces) se apresenta em três níveis.

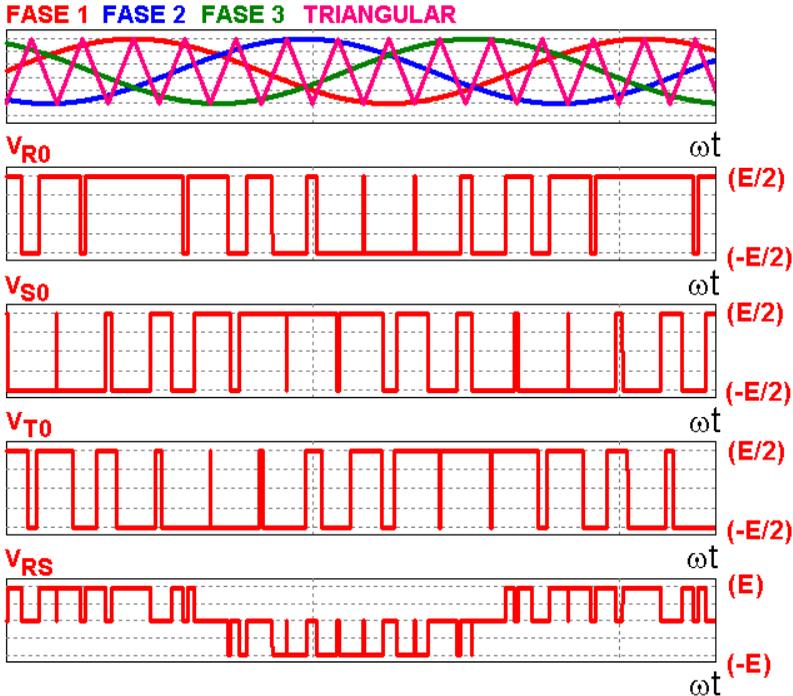


Figura 14 - Formas de onda da tensão de saída para um inversor trifásico de tensão tipo 180° empregando modulação PWM senoidal.

2.4 Arduino

O Arduino é uma plataforma de *hardware* livre projetada com um microcontrolador AVR da Atmel em uma única placa com acesso a

todas as entradas e saídas do mesmo. Além de ter uma linguagem de programação padrão com origem no *Wiring*, que é essencialmente C/C++. Tem o objetivo de ser uma ferramenta acessível, com baixo custo, que apresente facilidade e flexibilidade na utilização por profissionais e amadores. Principalmente para aqueles que não teriam alcance aos controladores mais sofisticados e de ferramentas mais complicadas. [OXER, 2009]

Pode ser usado para o desenvolvimento de objetos interativos independentes, ou ainda para ser conectado a um computador hospedeiro. Uma típica placa Arduino é composta por um controlador, algumas linhas de E/S digital e analógica, além de uma interface serial ou USB, para interligar-se ao hospedeiro, que é usado para programá-la e interagi-la em tempo real. Ela em si não possui qualquer recurso de rede, porém é comum combinar um ou mais Arduinos deste modo, usando extensões apropriadas chamadas de *shields*. A interface do hospedeiro é simples, podendo ser escrita em várias linguagens. A mais popular é a Processing, mas outras que podem comunicar-se com a conexão serial são: Max/MSP, Pure Data, SuperCollider, ActionScript e Java. [ARDUINO, 2012]

2.4.1 Hardware

Como o Arduino apresenta várias versões de *hardware* com diferentes preços e aplicações, a descrição do mesmo vai ser feita para a versão UNO, utilizado neste trabalho. A abaixo apresenta as principais características.

Tabela 1 - Especificações de *hardware*.

Microcontrolador	Atmega328
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Pinos de E/S digitais	14 (dos quais seis oferecem saída PWM)
Pinos de entrada analógica	6

Corrente CC por pino de E/S	40 mA
Corrente CC no pino de 3.3V	50 mA
Memória <i>Flash</i>	32 KB (ATmega328)
SRAM	2 KB (Atmega328)
EEPROM	1 KB (Atmega328)
Velocidade	16 MHz

A Figura 15 mostra a versão básica do Arduino e mais encontrada para venda em páginas da internet.

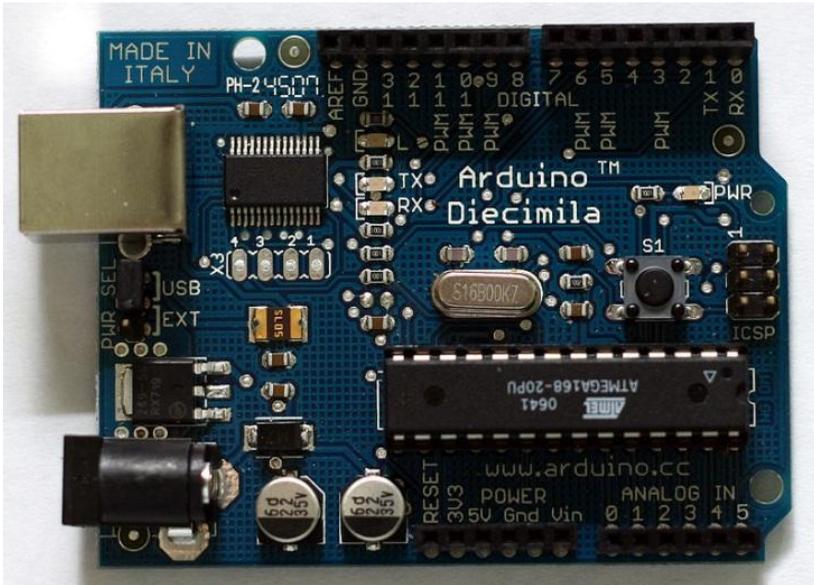


Figura 15 - Versão básica do Arduino. Fonte: <http://www.arduino.cc>, acesso em 01/2012.

2.4.2 Software

Segundo [BANZI, 2008] o Arduino IDE é uma aplicação multiplataforma desenvolvida em Java e derivada dos projetos *Processing* e *Wiring*. Foi desenvolvida de forma a introduzir a

programação para profissionais, hobistas e pessoas não familiarizadas com o desenvolvimento de *software*.

Inclui um editor de código com recursos de realce de sintaxe, parênteses correspondentes e endentação automática, sendo capaz de compilar e carregar programas para a placa com um único clique. Com isso não há a necessidade de editar Makefiles ou rodar programas em ambientes de linha de comando. [BANZI, 2008]

Dispondo da biblioteca chamada "*Wiring*", ele pode suportar linguagem programas escritos em C/C++. Assim permitindo criar com facilidade diversas operações de entrada e saída, apenas definindo duas funções para fazer um programa funcional:

- *setup()* – Função inserida no início, normalmente utilizada para inicializar as configurações necessárias para o funcionamento do programa escrito.
- *loop()* – Função chamada para executar ou repetir um bloco de comandos ou ficar em espera até que seja desativada.

Frequentemente, o primeiro programa que é executado possui a simples função de piscar um LED. A Figura 16 apresenta o ambiente de desenvolvimento, onde o usuário escreve um programa exemplo com a função de piscar um único LED.



The image shows the Arduino IDE interface. The title bar reads "Arduino - 0011 Alpha". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". The toolbar contains icons for running, stopping, saving, opening, and other functions. The main text area displays the "Blink" sketch code. The code is as follows:

```
/*
 * Blink
 *
 * The basic Arduino example. Turns on an LED on for one second,
 * then off for one second, and so on... We use pin 13 because,
 * depending on your Arduino board, it has either a built-in LED
 * or a built-in resistor so that you need only an LED.
 *
 * http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
 */

int ledPin = 13;           // LED connected to digital pin 13

void setup()               // run once, when the sketch starts
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // sets the digital pin as output
}

void loop()                // run over and over again
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH); // sets the LED on
  delay(1000);                // waits for a second
  digitalWrite(ledPin, LOW);  // sets the LED off
  delay(1000);                // waits for a second
}
```

Below the code editor, a status bar shows "Done compiling." and "Binary sketch size: 1098 bytes (of a 14336 byte maximum)". The page number "22" is visible in the bottom left corner.

Figura 16 - Ambiente de desenvolvimento do Arduino. Fonte: BANZI, 2008.

2.5 Laboratório Remoto

Com o rápido desenvolvimento da Internet e seus recursos tornou-se fácil o acesso a informações, sendo estes textos ou multimídia. Com tais características o serviço *WEB* se mostrou bastante promissor para desenvolvimento de ambientes aplicados a educação à distância e presencial ao explorar recursos que permitem:

- Identificação, avaliação e integração de uma grande variedade de informação.
- Conversação, colaboração, discussão, troca e comunicação de ideias.
- Participação em experiências simuladas, aprendizagem e parcerias cognitivas.
- A expressão e construção coletiva de conceitos, significados artísticos e cognitivos.

(Lucena e Fucks, 2000. Apud MARCHEZAN, 2008)

Outra tecnologia desenvolvida nos últimos anos são os sistemas de instrumentação e medidas baseados em computador. [MARCHEZAN, 2008]

Segundo [National, 2001. Apud MARCHEZAN, 2008] empresas como National Instruments, desenvolvedora do *software* LabView e *hardware* para instrumentação, têm oferecido diversos produtos que atendem os mais diversos propósitos.

Assim, ao associar a tecnologia da Internet com os instrumentos baseados em computador criam-se meios para o desenvolvimento de ambientes de aprendizado remoto onde o aluno pode ter acesso a atividades laboratoriais a longa distância como se estivesse presente fisicamente no laboratório.

Pode-se dizer que, o laboratório remoto é composto por um sistema físico que se deseja analisar experimentalmente, neste caso específico os motores elétricos. Todas as informações e o controle sobre

o motor (objeto de estudo) são realizados através de um módulo de aquisição de dados e controle, que envia as informações na forma digital para um computador conhecido como servidor. A Figura 17 ilustra este sistema de uma forma esquemática, mostrando todos os principais componentes do laboratório.

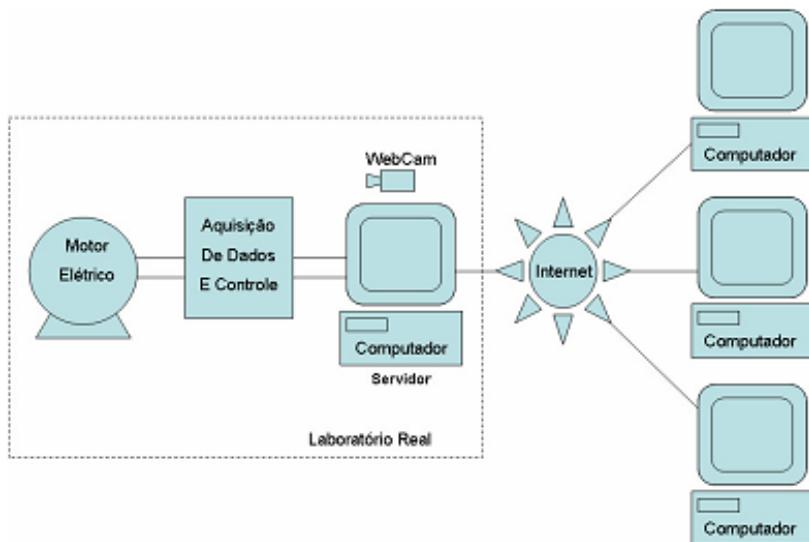


Figura 17 - Representação de um laboratório remoto. Fonte: CASTRO, 2010.

Assim o laboratório remoto permite que o usuário possa controlar e monitorar as reações do sistema físico em experimentação de qualquer local com acesso à Internet ou rede local e no horário mais conveniente para sua rotina de atividades. Desta forma, um laboratório com elevado custo (como são a maioria dos laboratórios bem equipados), pode ser utilizado ininterruptamente, muito diferente do que acontece nos laboratórios tradicionais que apresentam enorme tempo ocioso. [Auer, 2008]

Este fato vem gerando parcerias entre universidades americanas e europeias que dividem o custo de implantação de um único laboratório e compartilham sua utilização com o benefício do fuso horário, ou seja, no período noturno ou

madrugada de um local (ocioso) o outro está em plena atividade e pode utilizar o laboratório livremente. [NI, 2009. Apud CASTRO, 2010]

2.6 PHP

PHP é um acrônimo recursivo para PHP: *Hypertext Preprocessor*, ou seja, é uma linguagem de *script open source* de uso geral, bastante utilizada e especialmente fortalecida para o desenvolvimento de aplicações Web embutidas dentro do HTML . [PHP.NET.2005]

O PHP é uma linguagem de programação de computadores interpretada, livre e muito utilizada para gerar conteúdo dinâmico na Web. Mesmo sendo uma linguagem de fácil aprendizado e de uso para pequenos scripts dinâmicos e simples, o PHP é uma linguagem poderosa orientada à objetos. [MASETO, 2006]

Trata-se de uma linguagem extremamente modularizada, o que a torna ideal para instalação e uso em servidores web. Diversos módulos são criados no repositório de extensões PECL (PHP *Extension Community Library*) e alguns destes módulos são introduzidos como padrão em novas versões da linguagem. É muito parecida, em tipos de dados, sintaxe e mesmo funções, com a linguagem C e com a C++. Pode ser, dependendo da configuração do servidor, embutida no código HTML. Além disso, destaca-se a extrema facilidade com que PHP lida com servidores de base de dados, como MYSQL, PostgreSQL, Microsoft SQL Server e Oracle. [MASETO, 2006]

O que distingue o PHP de uma linguagem como Javascript do ponto de vista do cliente é que o código é executado no servidor, gerando o HTML que é então enviado para o cliente. O cliente recebe os resultados da execução desse *script*, mas não sabe como é o código fonte. Inclusive pode-se configurar o servidor para processar todos os

arquivos HTML como PHP, assim não há nenhum modo do usuário descobrir qual linguagem foi usada.

A Tabela 2 mostra um exemplo básico de programa em linguagem PHP.

Tabela 2 - Exemplo de programa em PHP. Fonte: PHP.NET, 2005.

```
<!DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.01 Transitional//EN"
"http://www.w3.org/TR/html4/loose.dtd">
<html>
  <head>
    <title>Exemplo</title>
  </head>
  <body>

    <?php
    echo "Olá, Eu sou um script PHP!";
    ?>

  </body>
</html>
```

Conforme a Tabela 2 nota-se que, ao invés de muitos comandos para mostrar o HTML (como visto em C ou Perl), páginas em PHP contém HTML juntamente com códigos que executam alguma ação definida (neste caso, mostrar "Olá, Eu sou um *script* PHP!"). O código PHP é delimitado por tags iniciais e finais <?php e ?> que lhe permitem sair e entrar do "modo PHP".

Apesar do desenvolvimento do PHP ser focado nos *scripts* do lado do servidor, podem ser executadas diversas tarefas. O PHP é focado para ser uma linguagem de script do lado do servidor, portanto, pode-se fazer qualquer coisa que outro programa CGI pode fazer, como: coletar dados de formulários, gerar páginas com conteúdo dinâmico ou enviar e receber cookies.

Vantagens se em utilizar o PHP:

Segundo [SOUSA, Sandro., 2005. Apud MASETO, 2006], as principais vantagens do PHP são:

- Licença gratuita.
- Plataforma (SO) gratuita para executá-lo (GNU/Linux).
- Velocidade de processamento.
- Eficiência de processamento.
- Métodos de segurança eficientes.
- Executado em qualquer tipo de plataforma (SO).
- Código fonte livre.
- *Exceptions* (para controle de fluxo).
- Orientação a objetos.
- É a linguagem Web mais popular e que mais cresce (em ritmo bem acelerado) no mercado segundo *netcraft 7*.
- Possibilita a utilização dos maiores e mais utilizados Bancos de dados no mercado (Adabas D, InterBase, PostgreSQL, dBase, FrontBase, SQLite, Empress, mSQL, Solid, FilePro, Direct MS-SQL Sybase, Hyperwave, MySQL, Velocis, IBM DB2, ODBC, Unix dbm, Informix, Oracle (OCI7 e OCI8), Ingres, Ovrimos, Firebird) sem necessitar de configuração externa;
- Está sempre em atualização com a correção de falhas e adição de novos recursos.
- Flexibilidade.
- Componentes nativos, não dependendo de componentes externos para algumas funcionalidades básicas.
- Documentação, controle e reportamento de erros.

- Comunidade de desenvolvimento participativa.
- Planos de hospedagem Web (na grande maioria dos casos) mais baratos e sem nenhum custo extra para a utilização do MySQL em conjunto com o PHP.

Desvantagens no uso do PHP:

Mesmo com uma grande lista de vantagens de PHP alguns autores consideram como desvantagens:

- Segundo [CANAL Html, 2006. Apud MASETO, 2006], há uma centralização incômoda das variáveis, e propenso a muitos bugs, nos quais um programador desatento pode deixar uma brecha para uma invasão.
- Segundo [ARSYS *Internet S.L.*, 2006. Apud MASETO, 2006], Poucos são os inconvenientes que podemos encontrar com esta linguagem de script. Tratam-se mais bem de pontos menos favoráveis, mas em nenhum caso, em desvantagem face ao uso de scripts em Perl.

Um destes pontos é:

- A depuração de erros, ainda que comum em todas as linguagens de *script* (e mais destacado no próprio Perl);
- O fato de o PHP ser uma linguagem especificamente concebida para a criação de *scripts* web faz que esteja em desvantagem para realizar outras tarefas, em relação às linguagens de propósito gerais como Perl. No entanto, no desenvolvimento de aplicações web, o PHP possui um ótimo desempenho;

Uma das grandes desvantagens do PHP é realmente a questão da mistura dos códigos de PHP com as tags do html, sendo separados apenas por blocos PHP. Entretanto, pode-se utilizar uma série de técnicas e padrões de projetos, dentre estes o mais conhecido é o MVC.

2.6.1 PHP4

A versão 4 do PHP foi oficialmente lançada em Maio de 2000, quase dois anos após o seu predecessor, o PHP 3.0. Além da otimização no desempenho, o mesmo incluiu outras características chaves como o suporte para vários servidores WEB, sessões HTTP, buffer de saída, maneiras mais seguras de manipular entrada de usuários e diversas construções novas na linguagem. Além de implementar as características de Orientação Objeto. [The PHP Group, 2005]

2.6.2 PHP5

Uma das principais características do PHP5 certamente é a implementação do conceito de programação orientada ao objeto em seu projeto. O que com certeza fez com que muitos programadores vissem o PHP com outros olhos. Até a versão 4 o PHP não suportava todas as características que uma linguagem de programação orientada à objeto deve conter. Com a reescrita do núcleo da linguagem ocorrida na versão 5 isso mudou. [MASETO, 2006]

3. Desenvolvimento de protótipo de laboratório

Neste capítulo serão apresentados os elementos do estágio de potência do conversor, dividido em dois estágios: retificador da tensão de entrada e ponte trifásica inversora. Também serão expostos os circuitos de comando e controle baseados em notas de aplicação dos fabricantes de semicondutores como: International Rectifier (IRF), Allegro Microsystems, Inc. Após o projeto e exposição dos circuitos complementares serão mostrados os leiautes das placas de circuito impresso usadas no protótipo.

Também será explanado brevemente o *firmware* embarcado no microcontrolador, tendo como base o fluxograma do *firmware*. Além de explicar como será a interface do protótipo com o usuário. Na Figura 18 é apresentado o diagrama em blocos do protótipo.

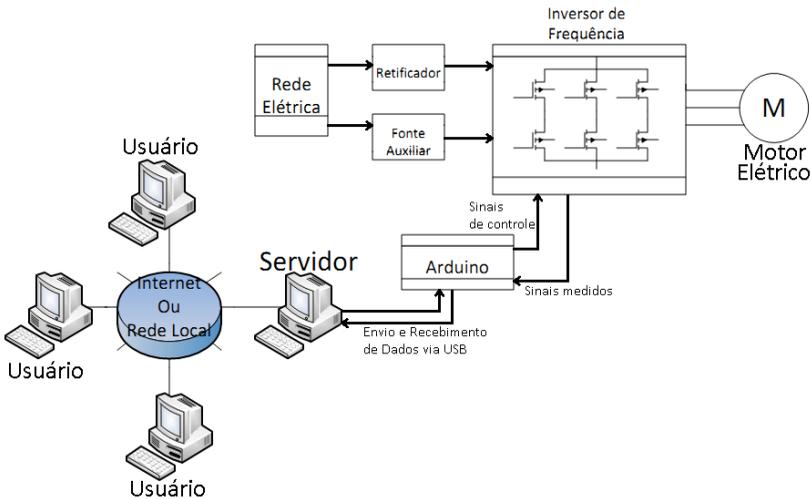


Figura 18 - Diagrama em blocos do protótipo.

O **APÊNDICE I** apresenta o circuito do conversor CC-CA em sua totalidade incluindo os respectivos circuitos:

- Retificador de entrada com filtro capacitivo.

- Ponte inversora trifásica.
- Fontes auxiliares.
- Circuito de foto isolamento.
- Circuito de acionamento dos IGBTs.
- Sensores de corrente.
- Sensor de tensão.
- Circuito de Liga/Desliga do estágio de potência.
- Circuito de pré-carga dos capacitores de filtro do retificador.

3.1 Projeto e simulação do retificador de entrada com filtro capacitivo

A partir das equações apresentadas em [BARBI, 2002], calcula-se o retificador de entrada apresentado na Figura 19 de forma que ele possa suprir as necessidades do conversor CC-CA com uma margem de 63% a mais na potência de 1CV. Os requisitos, bem como os dados de entrada do retificador, são especificados a seguir:

Dados de entrada:

- Tensão alternada da rede elétrica:

$$V_{ac} = 220V$$

- Variação da tensão da rede elétrica:

$$\Delta V_{ac} = 15\%$$

- Frequência da rede elétrica:

$$F_{rede} = 60 \text{ Hz}$$

- Rendimento do retificador:

$$\eta_{retificador} = 70\%$$

- Potência de saída do retificador:

$$P_o = 1200 \text{ W}$$

- Queda de tensão em cima de cada diodo retificador:

$$V_D = 1,2 \text{ V}$$

- Período de tensão senoidal proveniente da rede elétrica:

$$T_s = \frac{1}{60} = 0,01667 \text{ s}$$

- Máxima ondulação de tensão na saída do retificador:

$$\Delta V_{Cretificador} = 10\%$$

- Potência de entrada necessária fornecida pela rede:

$$P_{entrada} = \frac{P_{saída}}{\eta_{retificador}} = 1.714 \text{ W}$$

(5)

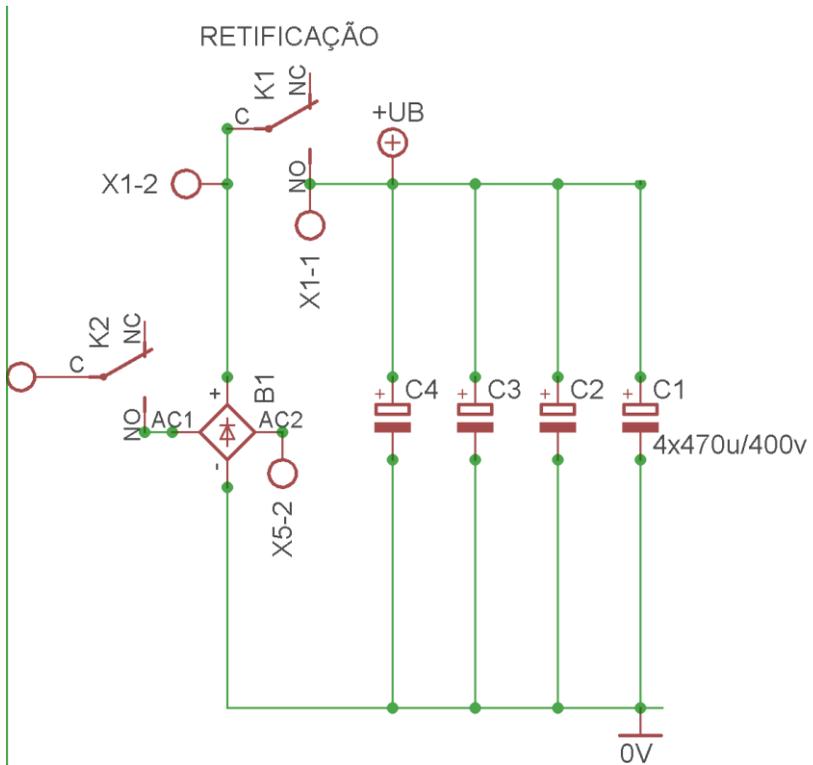


Figura 19 - Retificador de entrada.

Nesta seção serão quantificados os esforços de corrente e tensão nos diodos presentes no retificador, bem como o cálculo da capacitância necessário para filtrar a tensão pulsada deixando a tensão CC de barramento de acordo com os limites especificados no projeto.

- Tensão de entrada mínima:

$$V_{ac\ min} = V_{ac} \times (1 - \Delta V_{ac}) = 187V$$

(6)

- Tensão de entrada máxima:

$$V_{ac\max} = V_{ac} \times (1 + \Delta V_{ac}) = 253V \quad (7)$$

- Tensão máxima de pico:

$$V_{ac\max\ pk} = V_{ac\max} \times \sqrt{2} = 357V \quad (8)$$

- Tensão mínima de pico:

$$V_{pk} = (V_{ac\min} \times \sqrt{2}) - 2 \times V_D = 262,06V \quad (9)$$

- Tensão mínima aplica ao capacitor de filtro:

$$V_{c\min} = V_{pk} \times (1 - \Delta V_{cret}) = 235,85V \quad (10)$$

- Variação da tensão nos capacitores de filtro:

$$\Delta V = V_{pk} - V_{c\min} = 26,20V \quad (11)$$

- Valor da capacitância para filtragem da ondulação de tensão no retificador:

$$C_{ret} = \frac{P_{entrada}}{F_{rede} \times (V_{pk}^2 - V_{c\min}^2)} = 2,19 \times 10^{-3} F \quad (12)$$

- Intervalo de condução dos diodos ou tempo de recarga do capacitor:

$$t_c = \frac{\arccos\left(\frac{V_{c\min}}{V_{pk}}\right)}{2 \times \pi \times F_{rede}} = 1,196 \times 10^{-3} \text{ s}$$
(13)

- Pico de corrente durante intervalo de t_c :

$$I_p = \frac{C_{ret} \times \Delta V}{t_c} = 47,96 \text{ A}$$
(14)

- Corrente eficaz do capacitor:

$$I_{eficaz} = I_p \times \sqrt{(2 \times t_c \times F_{rede}) - (2 \times t_c \times F_{rede})^2} = 16,82 \text{ A}$$
(15)

- Valor eficaz para razão cíclica igual a 0,5 da corrente drenada pela alimentada pelo capacitor:

$$I_{2ef} = \frac{P_{entrada}}{V_{c\min}} = 7,27 \text{ A}$$
(16)

- Correntes eficazes nos diodos:

$$I_{Def} = I_p \times \sqrt{\frac{t_c}{T_s}} = 12,85 \text{ A}$$
(17)

- Correntes médias nos diodos:

$$I_{Dmed} = \frac{P_{entrada}}{2 \times V_{cmin}} = 3,63A$$

(18)

- Tensão máxima no diodo:

$$V_{Dmax} = V_{acmax} \times \sqrt{2} = 357,8V$$

(19)

- Corrente de pico nos diodos durante o intervalo $t_c(s)$:

$$I_{Dp} = I_p = 47,96A$$

(20)

Cálculo da corrente de partida:

- Pico de corrente máximo suportado pelo módulo retificador KBPC800, segundo o manual do fabricante:

$$I_{Dmax} = 125A$$

- Valor do resistor de pré-carga do filtro capacitivo:

$$R_{série} = \frac{\sqrt{2} \times V_{acmax}}{I_{Dmax}} = 2,862\Omega$$

(21)

Cálculo dos valores de resistência de carga para simulação:

- Resistência de carga para mínima tensão alternada de entrada:

$$R_{\min} = \frac{(V_{ac\min} \times \sqrt{2})^2}{P_o} = 58,282\Omega$$

(22)

- Resistência de carga para máxima tensão alternada de entrada:

$$R_{\max} = \frac{(V_{ac\max} \times \sqrt{2})^2}{P_o} = 106,682\Omega$$

(23)

3.1.2 Resultados simulação do retificador para cargas resistivas:

Nesta seção serão apresentados os gráficos com os resultados de simulação do retificador para os dois extremos da condição de operação do mesmo, ou seja, tensão mínima de entrada e tensão máxima de entrada. Onde a tensão mínima de entrada é $V_{ac\min} = 187 \text{ V}$ e a tensão máxima de entrada é $V_{ac\max} = 253 \text{ V}$, os valores das resistências de carga são retirados das equações (22) e (23).

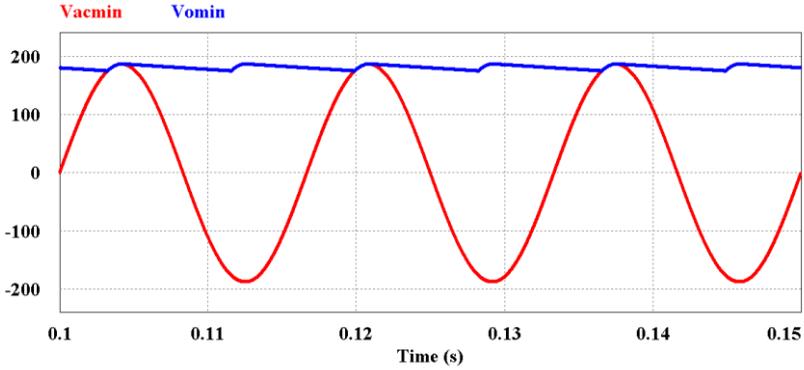


Figura 20 - Tensões de entrada e saída do retificador para operação com tensão de entrada mínima.

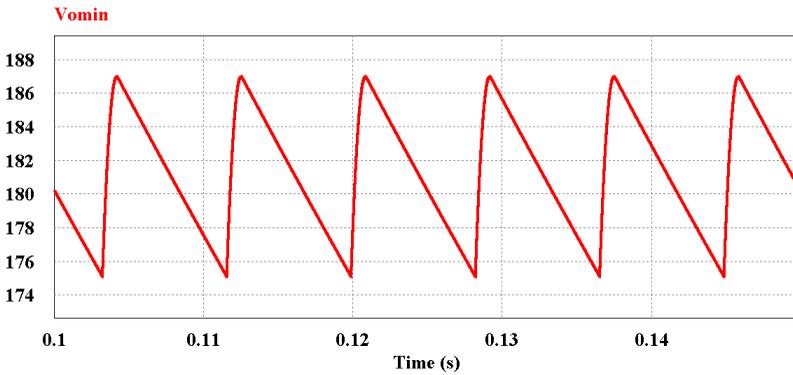


Figura 21 - *Ripple* da tensão de saída do retificador para operação com tensão de entrada mínima.

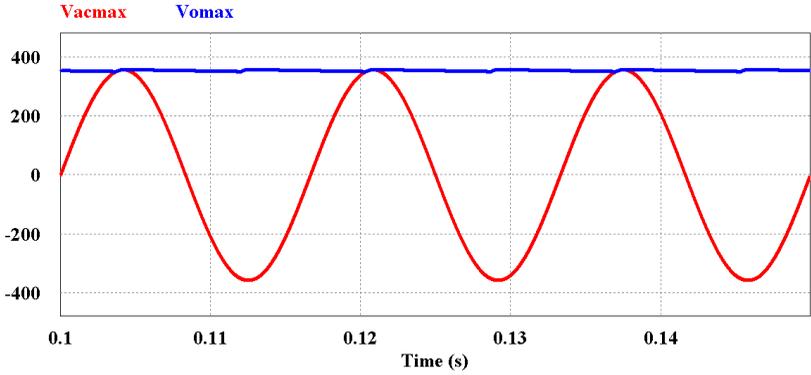


Figura 22 - Tensões de entrada e saída do retificador para operação com tensão de entrada máxima.

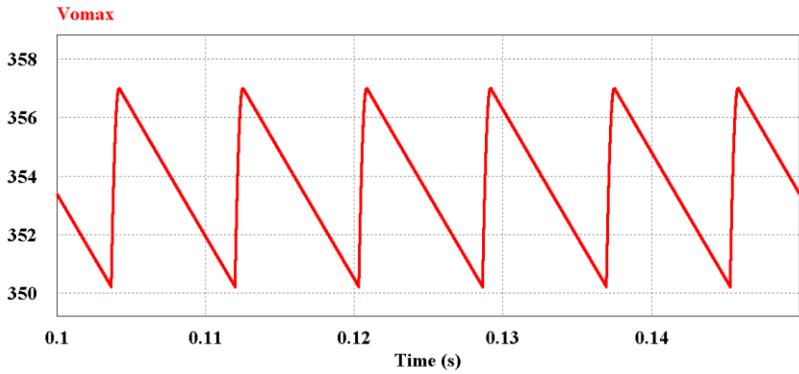


Figura 23 - *Ripple* da tensão de saída do retificador para operação com tensão de entrada máxima.

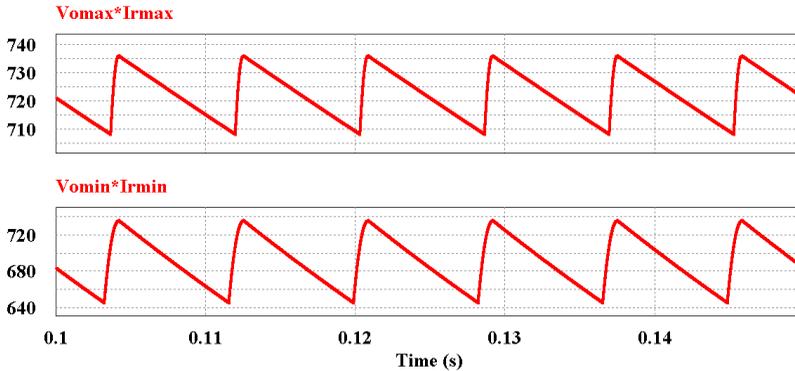


Figura 24 - Potência de saída do retificador.

Conforme apresentado nos gráficos da Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24 podem-se chegar as seguintes conclusões:

- Para os dois extremos da tensão de entrada e cargas adequadas calculadas nas equações (22) e (23) a potência permanece oscilando em torno de 736 W.
- A tensão média de saída para $V_{acmin}=187$ V fica em torno de 181 V e a tensão média de saída $V_{acmáx}=253$ V fica em torno de 353,5 V.
- O *ripple* da tensão de saída para $V_{acmáx}$ é de 6,71 V e o *ripple* da tensão de saída para V_{acmin} é de 11,83 V ambos respeitando o a variação de 10% especificada no projeto do retificador.

3.2 Projeto da ponte inversora trifásica

Nesta seção serão quantificados os esforços de corrente e tensão nos interruptores ativos e passivos do inversor. Algumas características deste conversor têm maiores influencias na escolha dos interruptores controláveis e passivos, como por exemplo, a tensão máxima a que são submetidos. A escolha dos interruptores deve satisfazer os esforços

máximos que podem ser determinados pelo equacionamento apresentado [GUEDES, 2000]. Na Figura 25 mostra-se a ponte inversora trifásica.

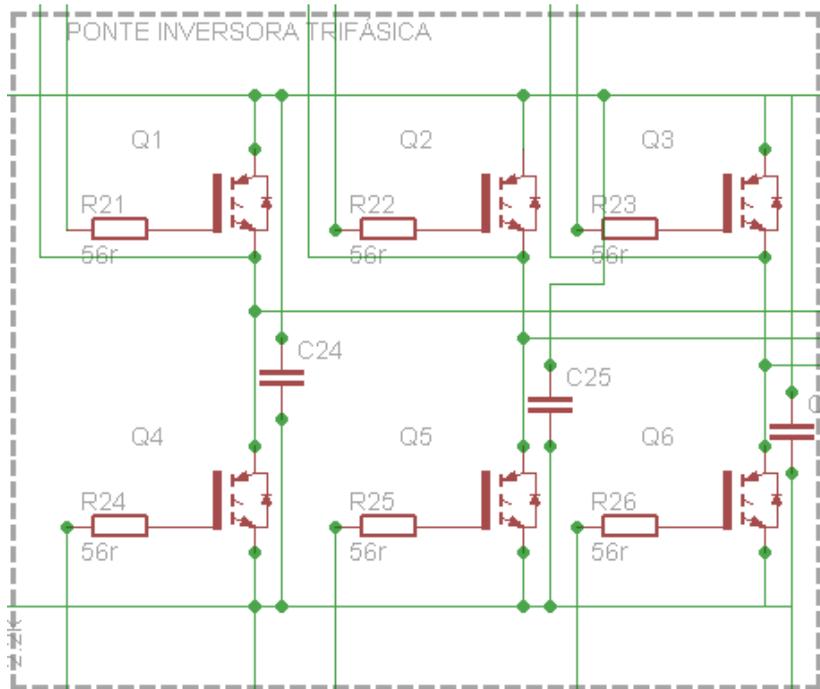


Figura 25 - Ponte inversora trifásica.

Dados de entrada:

- Potência nominal do motor:

$$P_{motor} = 736W$$

- Rendimento do motor:

$$\eta_{motor} = 80\%$$

- Fator de potência do motor:

$$fp = 0,7$$

- Frequência de comutação dos interruptores ativos:

$$F_{com} = 16.000Hz$$

- Índice de modulação:

$$m_o = 0,9$$

- Queda de tensão entre coletor e emissor do transistor IGBT GT10J303:

$$V_{ce} = 2,7V$$

- Corrente nominal do motor:

$$I_{motor} = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor} \times fp \times V_{ac} \times \sqrt{3}} = 3,449A$$

(24)

- Corrente eficaz:

$$I_{lef} = I_{motor} \times \sqrt{3} = 5,974A$$

(25)

- Corrente de pico:

$$I_{lpico} = I_{lef} \times \sqrt{2} = 8,449A$$

(26)

Dimensionamento dos interruptores ativos:

A partir das Equações extraídas [GUEDES, 2000], calcula-se a corrente média nos interruptores ativos. Calcula-se para a pior situação,

quando o índice de modulação de saída é o máximo especificado para o projeto.

$$I_{smédia} = I_{lpico} \times \left(\frac{(0,9 \times 0,9)}{8} + \frac{1}{2\pi} \right) = 2,2A \quad (27)$$

Da mesma forma, com o auxílio de [GUEDES, 2000], calcula-se a corrente eficaz para a máxima razão cíclica.

$$I_{seficaz} = I_{lpico} \times \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{(0,9 \times 0,9)}{3\pi}} = 3,88A \quad (28)$$

- Potência aparente da carga ligada ao inversor:

$$S = \frac{P_{motor}}{fp} = 1.051W \quad (29)$$

Dimensionamento dos interruptores passivos:

Segue abaixo o cálculo da corrente média nos interruptores passivos.

$$I_{Dmédia} = I_{lpico} \times \left(\frac{-(0,9 \times 0,9)}{8} + \frac{1}{2\pi} \right) = 0,489A \quad (30)$$

Da mesma forma, calcula-se a corrente eficaz para a mínima razão cíclica.

$$I_{Deficaz} = I_{lpico} \times \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{(0,9 \times 0,9)}{3\pi}} = 1,67 A$$
(31)

- Potência média dissipada em cada diodo de roda livre:

$$P_{Dm\u00e9dia} = I_{Dm\u00e9dia} \times 2 = 0,978 W$$
(32)

- Pot\u00eancia m\u00e9dia total dissipada nos seis diodos de roda livre:

$$P_{Dm\u00e9diaT} = P_{Dm\u00e9dia} \times 6 = 5,871 W$$
(33)

Pot\u00eancia dissipada para o c\u00e1lculo t\u00e9rmico:

- Pot\u00eancia dissipada em condu\u00e7\u00e3o em cada interruptor ativo considerando V_{GE} (tens\u00e3o de gate-emissor) igual a 15 V:

$$P_{scond} = V_{ce} \times I_{sm\u00e9dia} = 5,94 W$$
(34)

- Pot\u00eancia em condu\u00e7\u00e3o total dissipada nos seis interruptores:

$$P_{scondT} = P_{scond} \times 6 = 35,64 W$$
(35)

- Grandeza el\u00e9trica necess\u00e1ria para o c\u00e1lculo das perdas durante a comuta\u00e7\u00e3o dos interruptores ativos extra\u00edda de \u00e1bacos dispon\u00edveis no manual do fabricante:

$$Ener = 0,2 \times 10^{-3} mJ$$

- Perda durante a comutação:

$$P_{scomT} = P_{scom} \times 6 = 19,2W$$

(36)

$$P_{dissT} = P_{scomT} + P_{scondT} + P_{DmédiaT} = 60,711W$$

- Dados extraídos do manual do fabricante do transistor IGBT GT10J303:

- Temperatura máxima suportada pela junção semicondutora:

$$T_j = 150^\circ C$$

- Resistência térmica do IGBT entre junção semicondutora e encapsulamento:

$$R_j = 9^\circ C/W$$

- Temperatura ambiente:

$$T_a = 40^\circ C$$

- Máxima resistência térmica entre a junção semicondutora e o ambiente (BARBI, 2002):

$$R_{j\acute{m}ax} = \frac{(T_j - T_a)}{P_{dissT}} = 1,812^\circ C/W$$

(37)

Assim através do resultado obtido pela equação (37) pode-se definir o dissipador de calor com o auxílio do catálogo do fabricante de dissipadores.

- Rendimento esperado do conversor:

$$\eta_{conversor} = \left(\frac{P_{motor} - P_{dissT}}{P_{motor}} \right) \times 100 = 91,751\% \quad (38)$$

3.2.1 Resultados simulação da ponte inversora trifásica para carga resistiva:

Nesta seção serão apresentados os gráficos com os resultados de simulação da ponte inversora trifásica para as seguintes condições: tensão da rede elétrica igual a 220 V e carga trifásica RL ligada em triângulo de 1 CV.

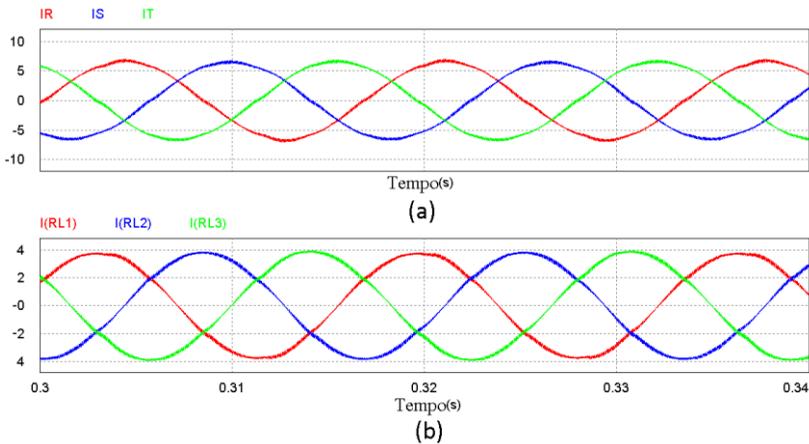


Figura 26 – a) Correntes de linha; b) Correntes de fase.

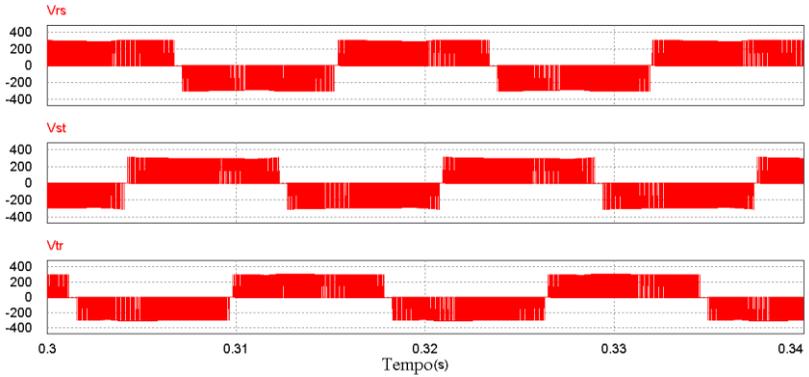


Figura 27 - Tensões de saída trifásicas.

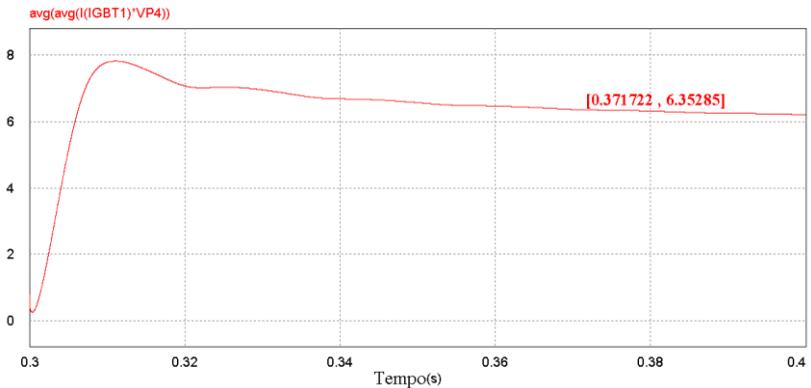


Figura 28 - Potência dissipada em uma das chaves ativas.

Conforme apresentado nos gráficos das figuras Figura 26, Figura 27 e Figura 28 pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A potência média em condução dissipada nos interruptores ativos é próxima da potência média em condução calculada ficando em torno de 6,35 W.
- As correntes de carga apresentadas se mostram com um formato senoidal e defasadas de 120° uma da outra.

- As tensões de fase também respeitam a defasagem de 120° entre fases.

3.3 Propostas do circuito de Comando e Controle

O circuito de comando foi projetado seguindo como referência o *datasheet* do circuito integrado IRS2631DJPF que é um *driver* para o acionamento de 6 transistores IGBTs ou MOSFETs ligados em configuração de ponte inversora trifásica. Assim, o circuito de comando é dividido em: fontes auxiliares de alimentação, *driver* de acionamento e isolamento dos sinais de controle através de foto acopladores. Além do circuito de comando existem na placa do inversor os circuitos para o monitoramento das correntes de saída do conversor e tensão do barramento CC.

3.3.1 Fontes auxiliares

Na Figura 29 são apresentadas as fontes auxiliares responsáveis por alimentar o *driver* para os IGBTs, foto acopladores, transdutores de corrente e um transdutor de tensão.

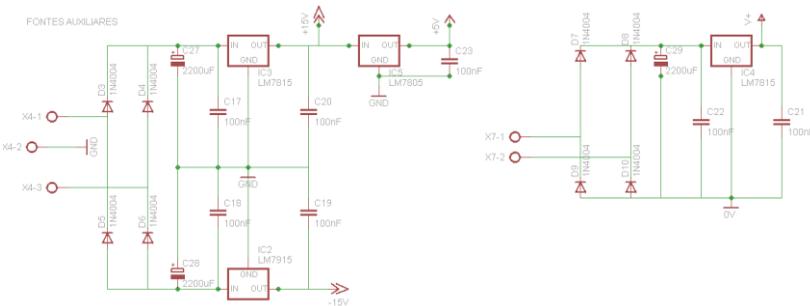


Figura 29 - Fontes auxiliares.

3.3.2 Circuito de foto isolamento

Nesta parte do circuito é feita a isolamento dos sinais PWM calculados e gerados pelo microcontrolador. A necessidade da isolamento vem do fato de existirem tensões e correntes no estágio de potência que poderiam causar danos ao circuito de controle ou até mesmo ao computador ligado a ele.

Para a isolamento dos sinais provenientes do microcontrolador faz-se necessário o uso de foto acopladores, como por exemplo, o HCPL2631, sinais que por sua vez são aplicados na porta do *driver* que comanda a comutação dos transistores IGBTs e simula um ponto referencial para cada transistor superior ligado a cada braço inversor. Na Figura 30 mostra-se o esquema de ligação dos fotoacopladores.

ISOLAÇÃO DOS SINAIS PWM

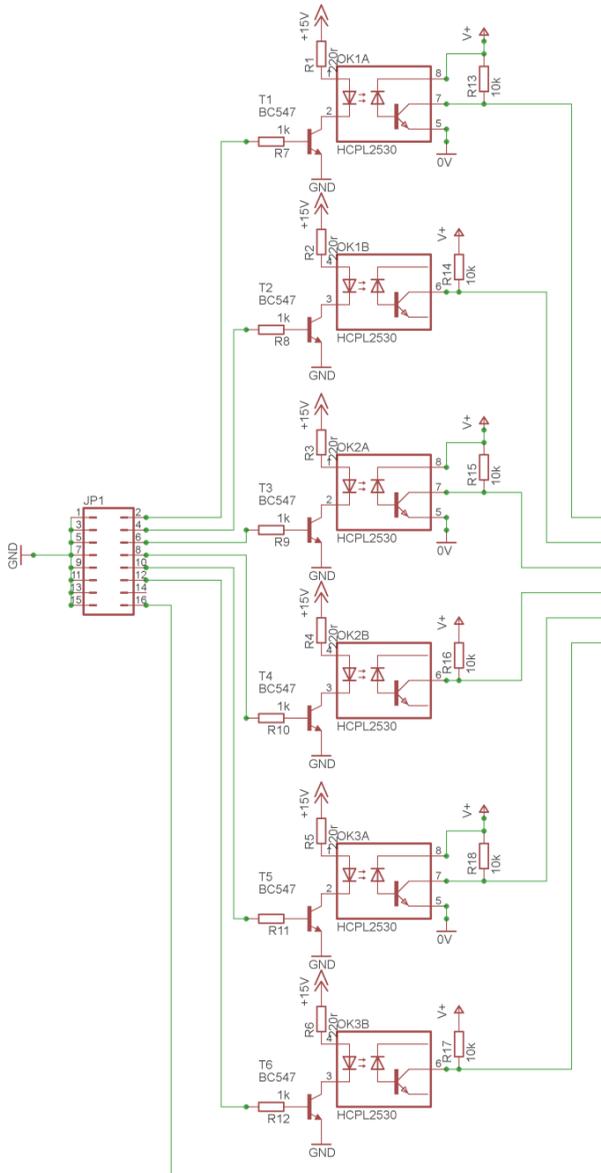


Figura 30 - Circuito de isolamento dos pulsos PWM.

3.3.3 Circuito de acionamento dos IGBTs

A Figura 31 mostra o esquema de ligação do *driver* mencionado no primeiro parágrafo da seção 3.3. Este *driver* utilizado para o acionamento dos transistores IGBTs presentes no inversor de frequência possui as seguintes características:

- Acionamento de até 6 IGBTs ou MOSFETs.
- Gate Drive fornece até 20 V por canal.
- Sensoriamento de proteção do barramento CC.
- Proteção contra sobre corrente.
- Proteção contra excesso de temperatura.
- Filtro avançado de entrada.
- Tempo morto (*deadtime*) integrado.
- Proteção contra condução cruzada.
- Proteção de subtensão para Vcc e Vbs.
- Time Clear ajustável.
- GND lógico e GND de potência separados.
- Entrada lógica compatível com 3,3 V.
- Tolerante a transientes negativos de tensão.
- Projetado para uso em fontes de alimentação com bootstrap.
- Atraso de propagação combinado em todos os canais.
- Faixa de operação de -40 °C a 125 °C.
- De acordo com RoHS.

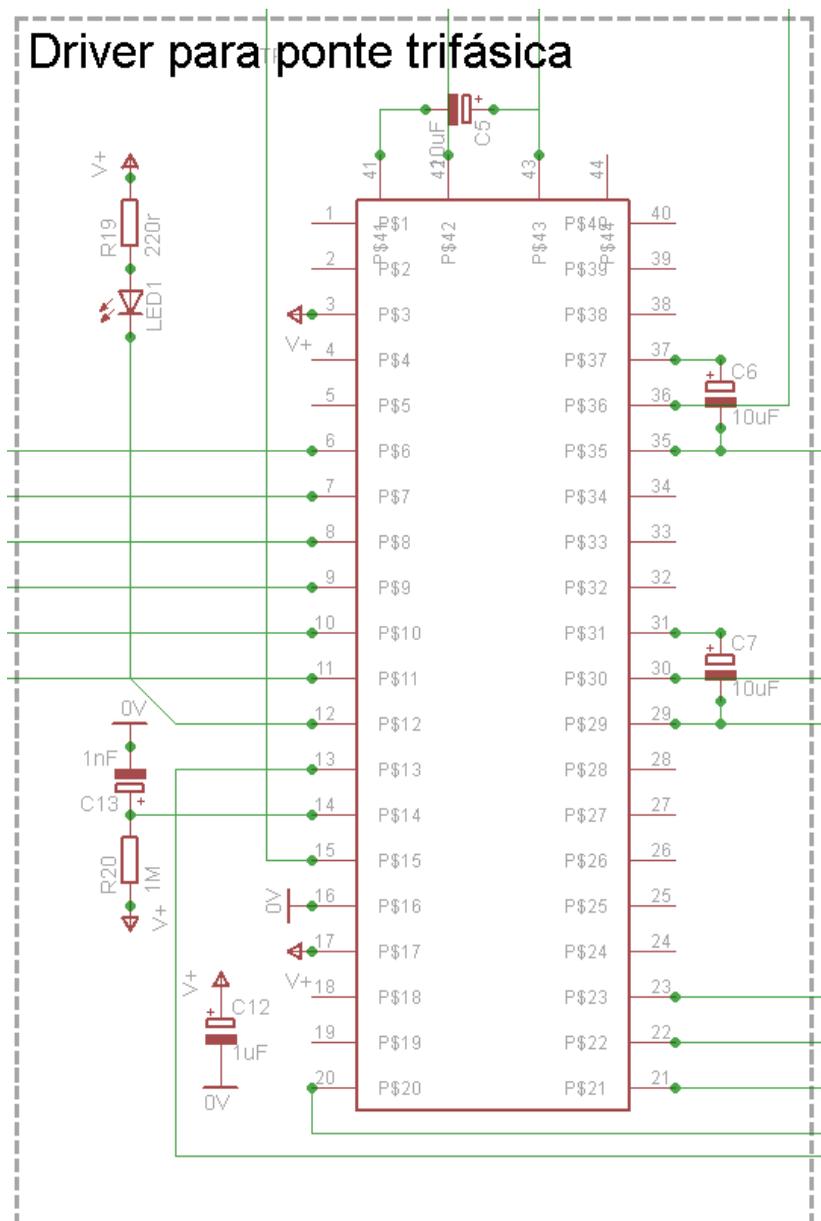


Figura 31 - *Driver* para acionar a ponte inversora trifásica.

Para os circuitos de monitoramento das grandezas elétricas envolvidas no funcionamento do inversor foram propostos e implementados os circuitos apresentados na Figura 32.

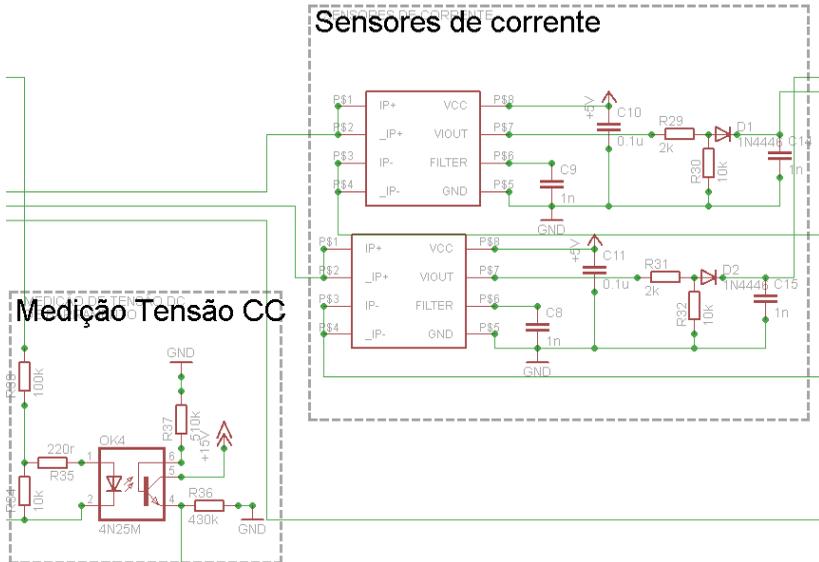


Figura 32 - Circuitos para medição das correntes e tensão de barramento CC.

3.3.4 Sensores de corrente

Conforme a Figura 32 o inversor conta com a presença de dois sensores de corrente. Estes sensores têm a função de disponibilizar os valores medidos da corrente de carga para a placa de controle. Os sensores escolhidos foram o ACS-712 da Allegro. Sua escolha deu-se devido à facilidade do uso destes sensores, pois podem fornecer uma saída em nível TTL em função da corrente de entrada.

Este modelo do sensor de corrente é dividido em três categorias, de cinco, vinte e trinta ampères de pico. O modelo escolhido foi o de cinco ampères, devido à máxima potência do inversor que é de 1 CV.

Os sensores são ligados de forma a fornecer sinal da tensão de saída de 0 V a 3,3 V como descrito em seu datasheet.

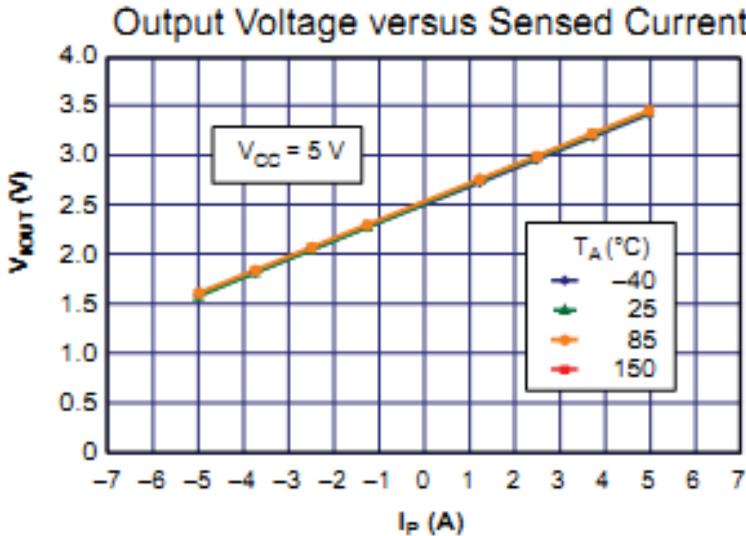


Figura 33 - Tensão de saída x Corrente de entrada. Fonte: <http://www.allegromicro.com>, Acesso em 10/2010.

3.3.5 Sensor de tensão

Esse sensor tem a função de monitorar e informar a tensão do barramento CC para o microcontrolador. O circuito foi montado e simulado com o intuito de operar com a região linear do foto acoplador 4N25. Na Figura 34 mostra-se a resposta do sensor ao aplicar uma tensão de barramento CC.

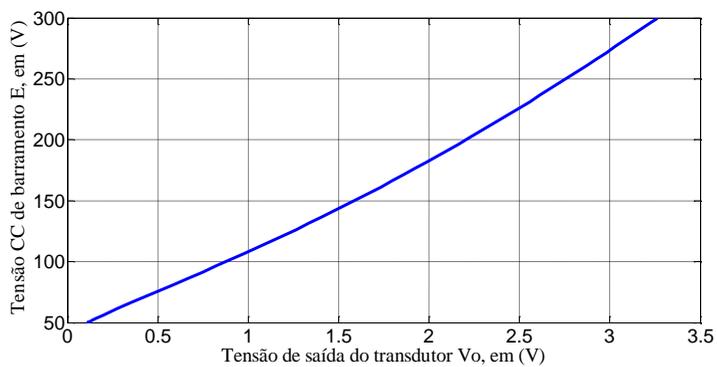


Figura 34 - Faixa linear de operação do transdutor de tensão.

3.3.6 Circuito de Liga/Desliga do estágio de potência

Nesta seção é apresentada uma simples topologia para ligar o estágio de potência através do sinal de comando proveniente da placa microcontrolada que for conectada ao inversor. Esse circuito consiste de um relé que vai ser acionado por um transistor que entra em condução quando é enviado um pulso do microcontrolador. Na Figura 35 mostra-se o esquema de ligação do circuito.

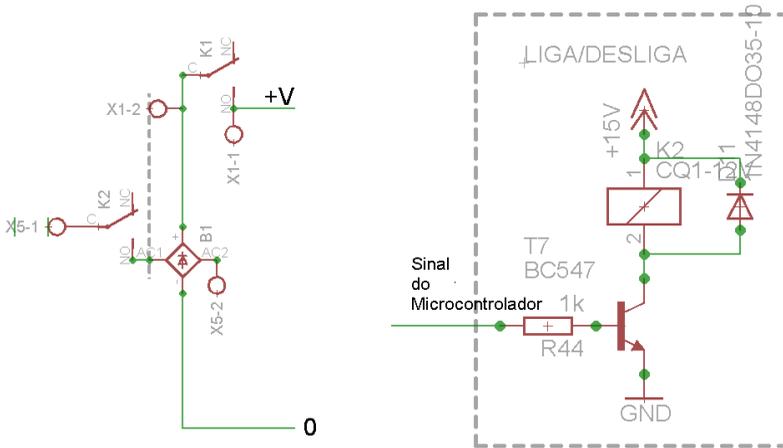


Figura 35 - Liga/Desliga.

3.3.7 Circuito de pré-carga dos capacitores de filtro do retificador

Nesta seção é apresentado o circuito responsável pela pré-carga dos capacitores de filtro do retificador. Na Figura 36 é apresentado o esquema de ligação do circuito de pré-carga. Os valores das resistências usadas no circuito são baseados na constante de tempo RC.

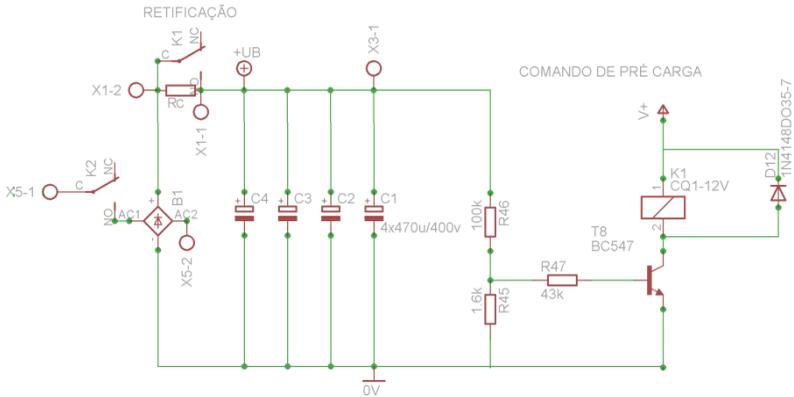


Figura 36 - Circuito de pré-carga dos capacitores de filtro do retificador.

3.4 Leiautes das placas utilizadas no projeto

Nesta seção são apresentados os leiautes das placas de circuito impresso das quais o protótipo é constituído. O protótipo foi dividido em duas placas:

- Placa de potência onde se encontra o estágio de retificação e conversão CC-CA além dos circuitos para medir corrente de carga e tensão de barramento CC.
- Placa de interface dos sinais entre o Arduino e a placa de potência.

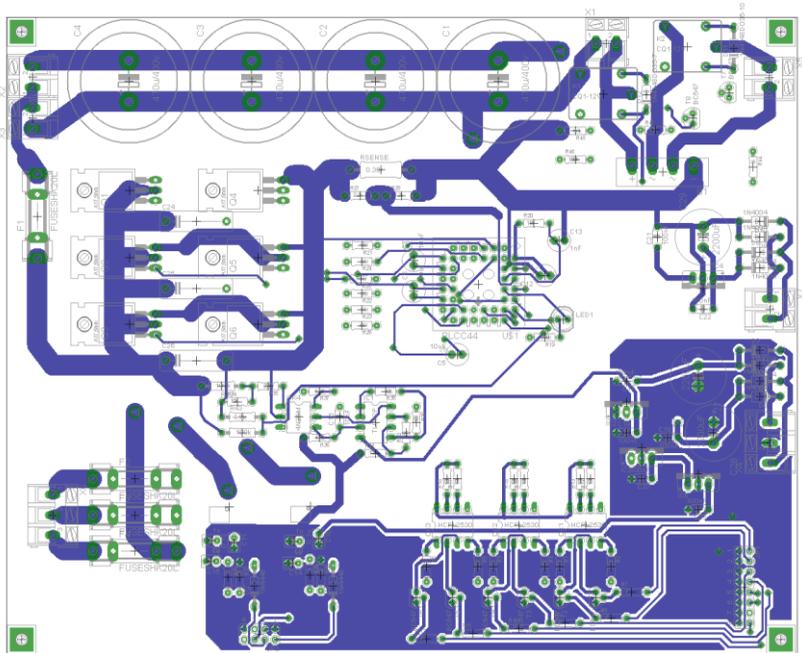


Figura 38 - Face inferior (bottom) da placa de potência do inversor de frequência.

3.4.2 Leiaute da Shield para Arduino

Nesta seção são mostrados os leiautes da *shield* e o diagrama esquemático da placa desenvolvida para o Arduino, a apresenta as dimensões de 68x53mm. Na Figura 39 é apresentado o diagrama esquemático do circuito. Na Figura 40 é apresentado o desenho do leiaute da face superior da placa e na Figura 41 mostra-se o desenho do leiaute da face inferior.

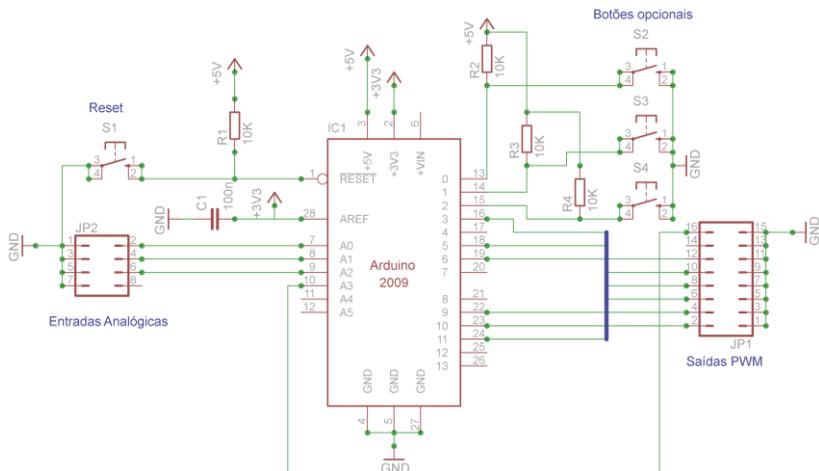


Figura 39 - Diagrama esquemático da *Shield* para o Arduino.

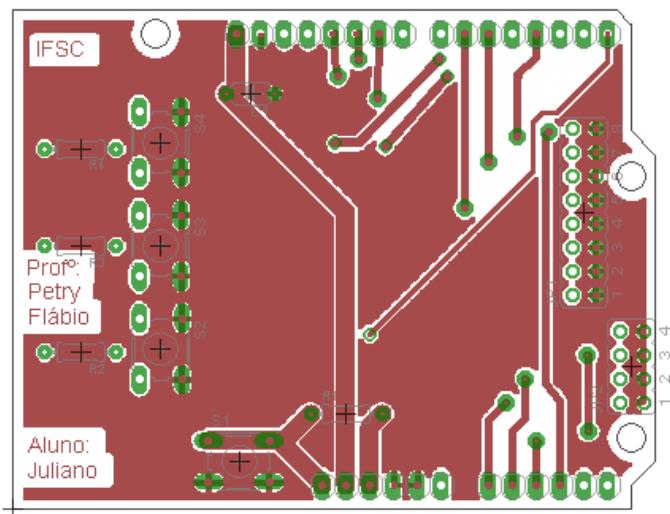


Figura 40 - Face superior (*top*) da *shield* de interface dos sinais de entrada e saída do Arduino.

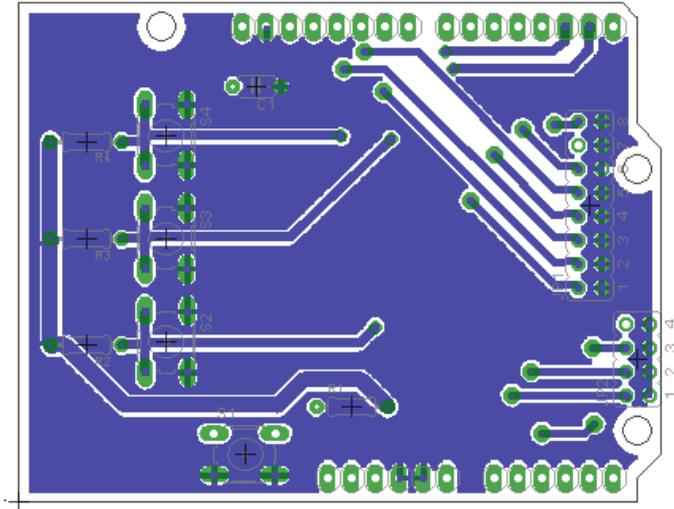


Figura 41 - Face inferior (*bottom*) da *shield* de interface dos sinais de entrada e saída do Arduino.

3.5 *Firmware embarcado*

Nesta seção é apresentado de forma sucinta o funcionamento do *firmware* necessário para o controle e monitoração do inversor de frequência. A Figura 42 apresenta o fluxograma do *firmware* desenvolvido e embarcado no microcontrolador.

Conforme o fluxograma apresentado na Figura 42 pode-se descrever o funcionamento do *firmware* na seguinte sequência:

(1°) São incluídos os arquivos quem compõem a biblioteca necessária para a compilação do *firmware* além de inicializar as variáveis utilizadas na execução das tarefas definidas para o funcionamento do inversor.

(2°) O microcontrolador fica comunicando-se com o *software* **Hercules** a espera do acionamento de uma tecla aleatória para que seja mostrada na tela o menu de opções.

(3º) Quando é escolhida a opção para a execução da tarefa a tarefa é executada. Se não for escolhida nenhuma opção o sistema continua em espera. Se for escolhida alguma opção inválida o sistema volta para o início do menu.

(4º) Se durante a execução da tarefa escolhida for pressionada alguma tecla aleatória a tarefa continua sua execução, porém o menu de opções é mostrado na tela para uma eventual troca de tarefas.

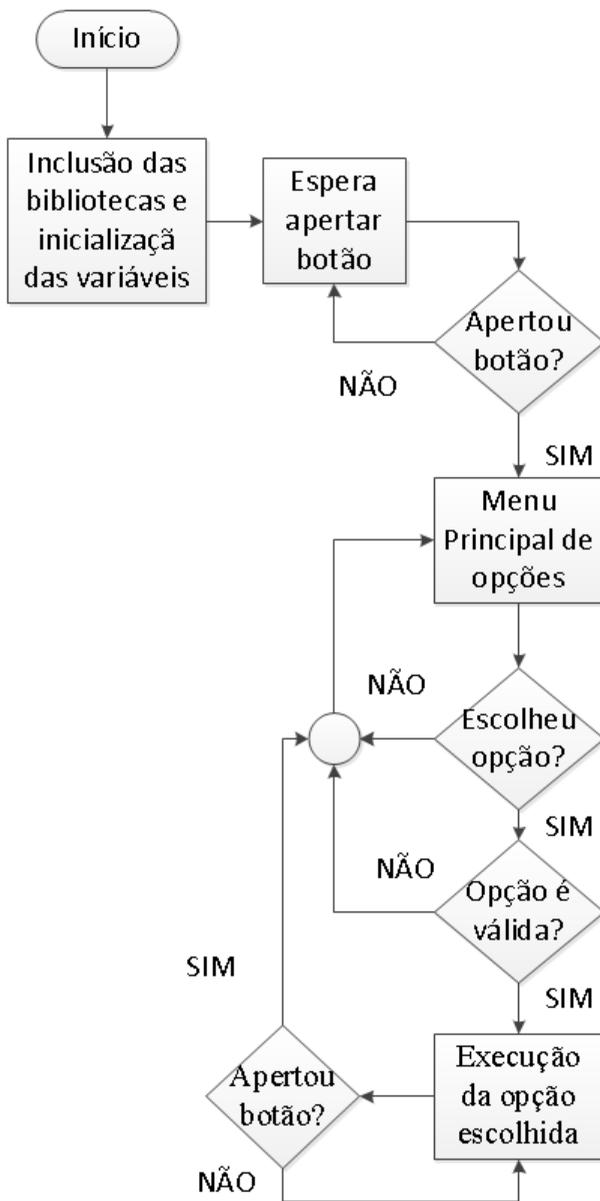


Figura 42 - Fluxograma do firmware embarcado no microcontrolador.

3.6 Interface com o usuário

Nesta seção é descrita de forma simples como se dá a interface de comunicação do usuário com o inversor de frequência. A interface dá-se por duas formas: via acesso remoto (web) ou acesso local direto do computador servidor que está ligado ao Arduino.

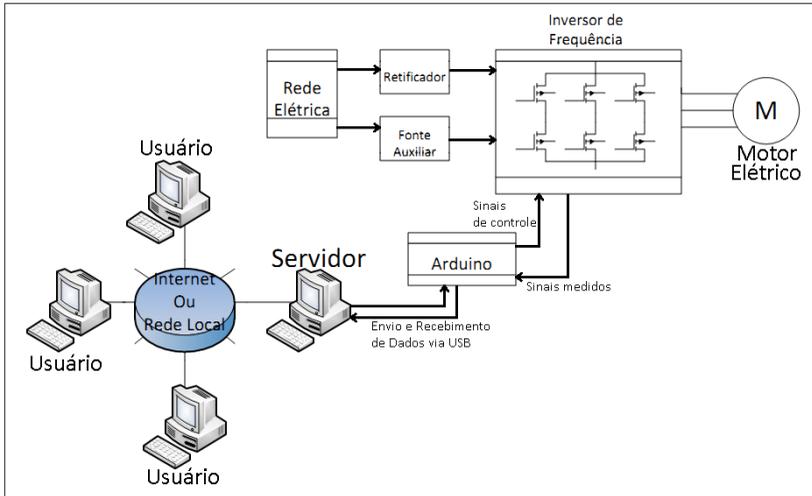
Nas duas formas o *Arduino* recebe os dados via USB. A principal diferença entre eles é que no acesso remoto o computador fica como servidor esperando os dados da web e repassando ao *Arduino* e esperando a resposta do mesmo e repassando para a web; já o acesso local é feito por um simples *software* livre, o Hercules que serve como terminal de comunicação com o *Arduino*. A Figura 43 exemplifica a estrutura das duas formas de interfaces.

Conforme mostra a Figura 43(a) a comunicação do Arduino com a internet ou rede local é feita com o auxílio de um computador com a função de servidor da página desenvolvida em PHP. Essa página em PHP tem a função de receber os dados via acesso local ou internet e enviar para a porta USB do servidor conectado ao Arduino ligado no inversor de frequência. Assim, além de enviar os dados a página também pode receber os dados amostrados pelo Arduino. É importante salientar que a página em PHP é acessada através da utilização de um servidor APACHE rodando no sistema operacional. Tal servidor faz parte do pacote de *softwares* XAMPP que é composto por: APACHE, MySql, FileZilla e Mercury.

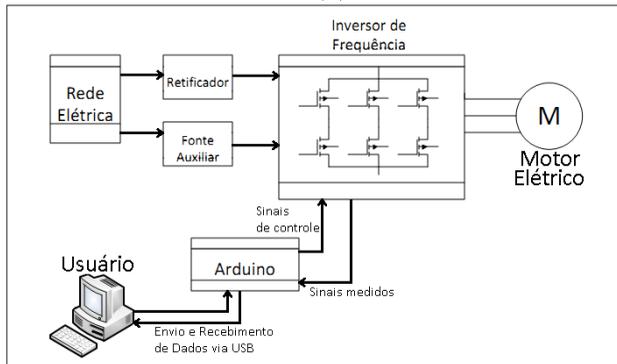
Assim, com a utilização do servidor APACHE a página pode ser acessada digitando-se o seguinte endereço no navegador da internet: localhost/inversor quando é utilizado o computador servidor. Já para um usuário remoto deve-se digitar o seguinte endereço: xxx.xxx.x.xxx:80/inversor.

Outro ponto importante da comunicação do Arduino com a rede local ou internet é que o microcontrolador só enxerga a interface de comunicação serial, ou seja, o mesmo só necessita da configuração correta da USART para poder se comunicar.

A seguir são apresentadas as interfaces gráficas usadas no projeto. Na Figura 44 é apresentada o menu de opções iniciais apresentados no *software* Hercules. Já na Figura 45 é apresentada a interface web disponível para o usuário ligar e desligar o inversor, além de poder ver o valor de corrente da carga.



(a)



(b)

Figura 43 - (a) Interface com usuário via web; (b) Interface com usuário via acesso local.

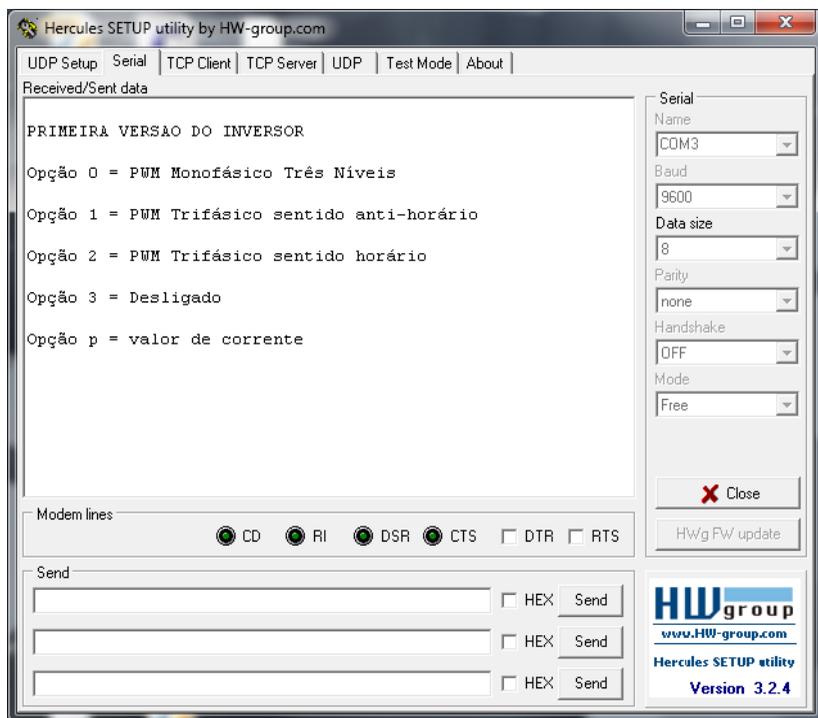


Figura 44 - Terminal de comunicação serial Hercules utilizada para escolha de acionamento do inversor.

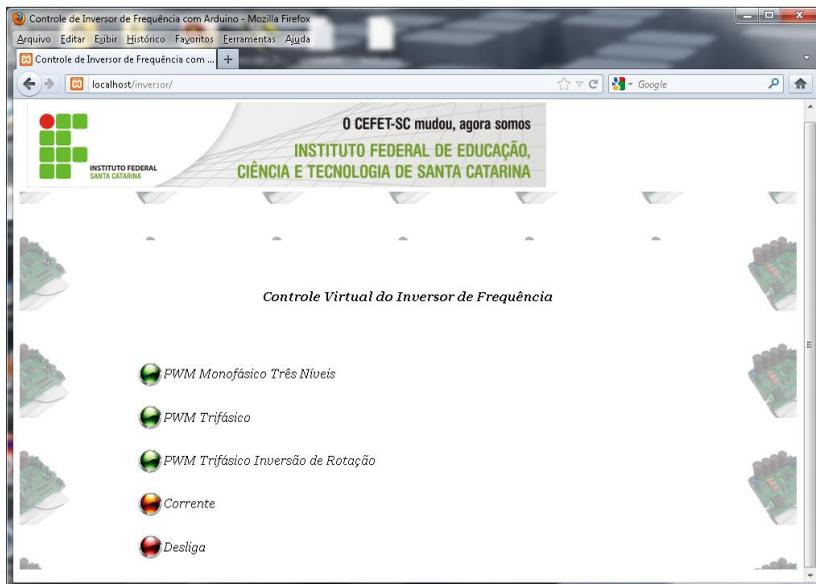


Figura 45 - Página web utilizada para o acesso remoto do inversor.

Conforme apresentado nas figuras 44 e 45 pode-se executar quatro tarefas básicas com o protótipo: pwm monofásico três níveis, pwm trifásico, pwm trifásico inversão de rotação, verificar a corrente consumida pela carga e desligar o protótipo.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais do inversor projetado conforme o capítulo 3. Serão mostrados os resultados para operação em malha aberta levando em consideração os parâmetros apresentados na Tabela 3 para o teste com um motor de indução trifásico sem a aplicação de carga no eixo do motor e na Tabela 4 os parâmetros para teste com lâmpadas. A Figura 46 mostra a bancada experimental utilizada para obtenção dos resultados.



Figura 46 - Foto da bancada de experiências.

Tabela 3 - Parâmetros para os testes com motor de indução.

Tensão CC de barramento	300V
Potência nominal do motor	736W
Fator de potência	0,7

Rendimento do motor	0,8
Número de polos	4
Ligação do motor	Δ
Frequência de comutação do inversor	3.921,6Hz
Índice de modulação	0,9
Frequência da fundamental	60Hz

Tabela 4 - Parâmetros para o teste com lâmpadas.

Tensão CC de barramento	311V
Tensão de trabalho da Lâmpada	110V
Número de lâmpadas ligadas em série	3
Frequência de comutação do inversor	3.921,6Hz
Índice de modulação	0,9
Frequência da fundamental	60Hz

Foram definidas as seguintes condições para a execução dos testes:

- a) Partida suave com índice de modulação inicial de 0,25 e final de 0,9 e desligamento gradual até índice de modulação igual a 0, sem o emprego de carga no eixo do motor.
- b) Reversão de rotação do motor quando em regime permanente sem o emprego de carga no eixo do motor.
- c) Partida direta e medição de correntes e tensões para lâmpadas em regime permanente.

Os resultados obtidos serão apresentados sob a forma dos gráficos das correntes i_R , i_S , i_T e tensão da fase V_R .

a) Partida suave com índice de modulação inicial de 0,25 e final de 0,9 e desligamento gradual até índice de modulação igual a 0.

Observa-se na Figura 47 a partida suave do motor que leva aproximadamente 10 segundos para ter suas correntes estabilizadas. Logo após os 40 segundos de operação é efetuado o comando para desligar o motor que entra em processo de desligamento suave com o decremento gradual na razão cíclica chegando a 0 em aproximadamente 10 segundos. A Figura 48 mostra de forma ampliada as correntes e tensão com o motor em regime permanente operando sem carga. Nota-se que a corrente do motor ligado sem carga fica em torno de 0,8 A rms por fase e a tensão máxima aplicada à saída do inversor é de 312 V além de ser visível a defasagem de 120° entre as correntes.

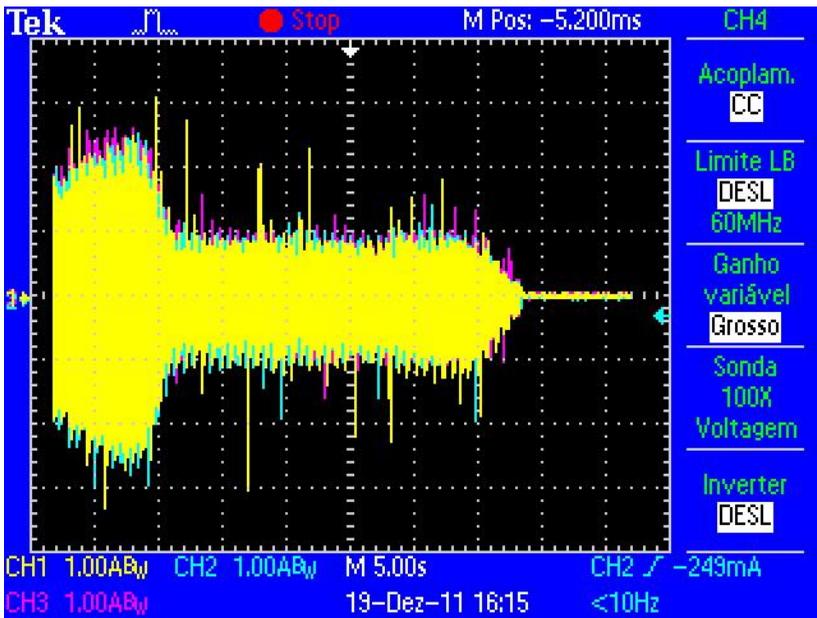


Figura 47 - Correntes de partida e desligamento do motor de indução.

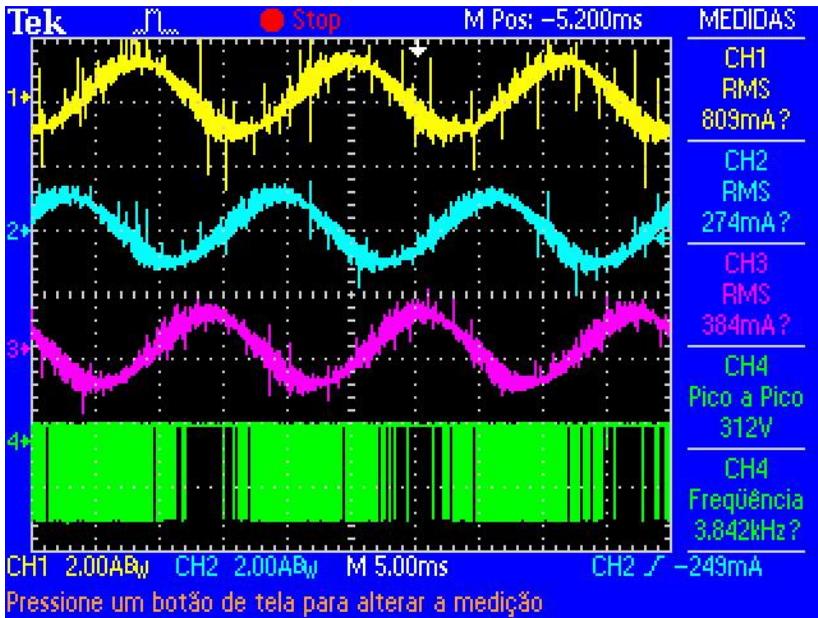


Figura 48 - Correntes e tensão medidas no terminal de saída do inversor alimentando um motor de indução trifásico.

b) Reversão de rotação do motor quando em regime permanente sem emprego de carga no eixo do motor.

Na Figura 49 apresenta-se a reversão de rotação do motor onde tem-se um pico de 5 A no instante da reversão já que o algoritmo de reversão não prevê uma desaceleração antes da reversão, nota-se também que leva em torno de 11 segundos para que as correntes voltem ao valor em regime de 0,8 A rms por fase.

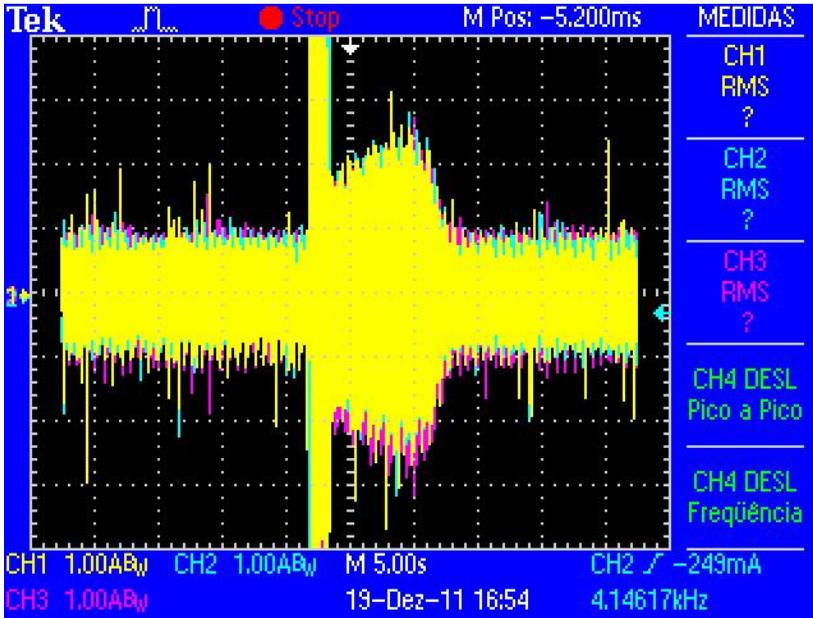


Figura 49 - Correntes em regime com reversão da rotação do motor.

c) Partida direta e medição de correntes e tensão para lâmpadas em regime permanente.

Na Figura 50 são apresentadas as formas de onda para o modo de operação monofásico do inversor utilizando a modulação PWM a três níveis. Nota-se que a corrente de carga fica em torno 0,9 A rms e a tensão aplicada é de 368 V. Assim, aplicando a fórmula $P = V \times I$, temos uma potência de carga de 342,71 W. Para esse teste foi usado um varivolt.

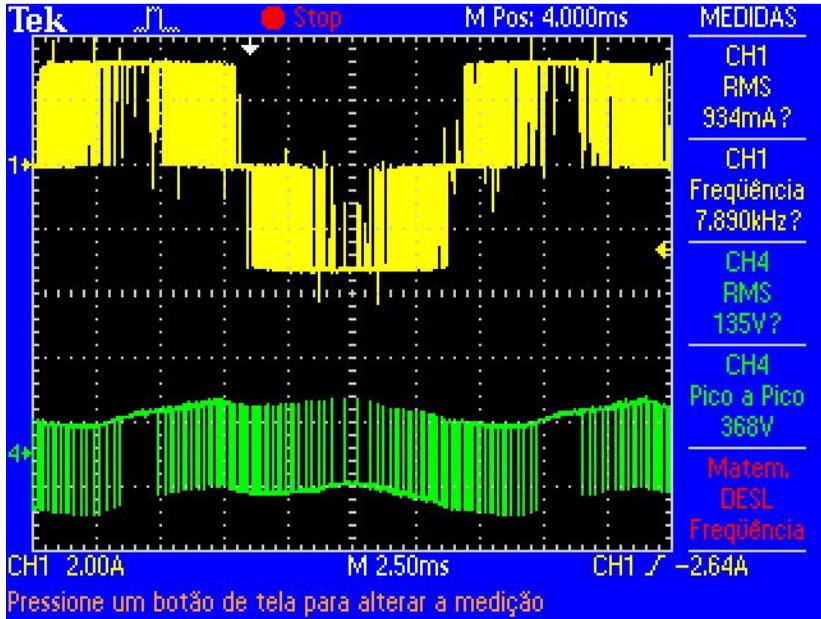


Figura 50 - Forma de onda de corrente e tensão para uma carga resistiva monofásica.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho inicialmente fez-se um estudo sobre a teoria dos conversores CC-CA citando-se seus tipos e aplicações, contudo mantendo o foco sobre os conversores CC-CA de tensão, especificamente os monofásicos em ponte completa e os conversores trifásicos. Seguindo uma sequência a partir do estudo sobre os conversores CC-CA de tensão, deu-se início a um estudo resumido sobre o controle de tensão aplicado a esses conversores, dando enfoque maior ao controle através da técnica de modulação PWM senoidal a três níveis. A partir dos temas supracitados foi escolhida a topologia do conversor CC-CA que atendesse os requisitos tanto para o acionamento de cargas monofásicas quanto de cargas trifásicas.

A partir desse ponto do trabalho foi feito um estudo sobre a plataforma de hardware livre para microcontroladores AVR chamada de Arduino; a qual se mostrou atrativa para aplicação no projeto devido ao seu baixo custo, flexibilidade do *hardware* e popularidade crescente no meio acadêmico e entre hobistas pela internet tornando fácil a pesquisa por artigos e sites que auxiliassem na construção do *firmware*.

Assim, na continuação abordou-se o tema sobre laboratórios remotos para servir de base na escolha da comunicação da plataforma didática com a internet ou redes locais. Entendendo os princípios de um laboratório remoto e analisando os recursos a disposição é que se deu a escolha da linguagem de programação PHP. Já que para o tipo de acesso ao *hardware* (acesso à porta USB do servidor ligado ao Arduino) que esta aplicação requiritava, o PHP era a melhor opção, além da disponibilidade de materiais relacionados à comunicação do Arduino via PHP.

Com o final do estudo base para o projeto deu-se início ao projeto e simulação do inversor de frequência além do projeto dos demais circuitos aplicados ao protótipo. O custo do protótipo ficou em torno de duzentos e cinquenta e seis reais levando em consideração o custo dos componentes, o Arduino e as placas de circuitos impressos. A seguir foi desenvolvido o *firmware* responsável pela escolha do modo de operação do inversor de frequência e também para monitorar as grandezas no processo de conversão CC-CA e na comunicação do Arduino com o

computador servidor. Durante o desenvolvimento do *firmware* constatou-se que o Atmega168 não poderia gerar os pulsos PWM na frequência definida no início do projeto do estágio de potência, contudo esse detalhe não interferiu de forma negativa no projeto já que a frequência de 3,9 kHz que melhor se adequou dada por

$$f_{pwm} = \frac{f_{cpu}}{510 \times n_{prescaler}}$$

presente em [LIMA, 2010] não ocasionou perda

de desempenho ou aumento de dissipação térmica. Por fim, foi feita a validação do funcionamento da etapa de potência e comunicação com o computador.

Após a validação do bom funcionamento do inversor de frequência e sua comunicação com o computador passou-se para o estágio de desenvolvimento da interface de comunicação do protótipo com a WEB e com redes locais.

Assim, com os objetivos principais alcançados ficam como proposta para trabalhos complementares ou trabalhos futuros as seguintes ideias:

- Melhorar a interface de comunicação serial do computador com o Arduino;
- Melhorar a interface WEB e implementar a visualização gráfica das formas de onda das correntes medidas no inversor de frequência;
- Incorporar mais funções ao *firmware* embarcado no microcontrolador, tais como: cálculo da potência consumida pela carga, além de implementar outras formas de modulação PWM e estratégias de controle para os inversores de frequência.

REFERÊNCIAS

AUER, M.E. – Remote Laboratory of the Carinthia Tech Institute. International Conference on Blended Learning, Florianópolis, 2008.

Barbi, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Teoria fundamental da eletrônica de potência**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2001.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 4. ed. Florianópolis: Ed. Do Autor, 2002.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Introdução ao estudo dos conversores CC-CA**. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2009.

BANZI, Massimo. **Getting started with Arduino**. 3. Ed. Make, 2008.

BOSE, Bimal K. **Technology advancement and trends in power electronics**. IECON Panel Discussion. IEEE, 2003.

Bin Wu. **High-Power Converters and AC Drives**, Wiley - IEEE Press, 2006, ISBN: 0-471-73171-4.

CASTRO, Bruno A. de.; CREPPE, Renato C. **Laboratório remoto para estudo de motores de indução**. São José do Rio Preto: Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2009. Disponível em: <http://prope.unesp.br/xxi_cic/27_32404249835.pdf> Acesso em 19 jun. 2011.

Fitzgerald, A.E. **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 2007.

GUEDES, José Augusto da Matta. **Conversor de tensão alternada com entrada monofásica e saída trifásica para aplicações rurais**. Dissertação de Mestrado em Eng.^a Elétrica. Florianópolis: UFSC, 2000.

LIMA, Charles Borges de. **Técnicas de projetos eletrônicos com os microcontroladores AVR**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2010.

Lucena C., Fuks H. **A Educação na Era da Internet**. Clube do Futuro, Rio de Janeiro.

MARCHEZAN, André R.; CHELLA, Marco T.; FERREIRA, Elnatan C. **Laboratório Remoto aplicado ao Ensino de Engenharia Eletrônica**. 2008. Disponível em: <<http://inf.unisul.br/~ines/workcomp/cd/pdfs/2211.pdf>> Acesso em 19 jun. 2011.

MASETO, Jhony M. **Análise avaliativa entre FRAMEWORKS DE PHP**. Monografia apresentada à UNOCHAPECÓ como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação. Chapecó – SC: Dezembro de 2006.

OXER, Jonathan. BLEMINGS, Hugh. **Practical Arduino Cool Projects for Open Source Hardware**. Ed. Technology in action, 2009.

PORTO, Luiz G C ; CREPPE, R. C. **Modelo matemático para análise de desempenho de motores elétricos em máquinas de processamento de arroz**. In: IV Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas: Anais do IV Encontro de Energia no Meio Rural - CD-ROM, 2002.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, dispositivos e aplicações**. Tradução Carlos Alberto Favato. São Paulo: Makron Books, 1999.

The PHP Group. 2005. Disponível em: <http://www.php.net/manual/pt_BR/history.php> Acesso em 5 jan. 2012.

ARDUINO. **Arduino**. 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>>. Acessado em 05/01/2012.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Definições gerais do *firmware* para o Atmega168

```
//Definições utilizadas no projeto
#define F_CPU 16000000UL
#include <avr/io.h> //definições do componente especificado
#include <util/delay.h> //biblioteca para o uso das rotinas de atraso
#include <compat/deprecated.h> //biblioteca para tratamento dos pinos de I/Os
#include <math.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/pgmspace.h> // biblioteca usada para leitura de tabelas
#include <stdio.h> // biblioteca

#define set_bit(Y,bit_x) (Y|=(1<<bit_x)) //ativa o bit x da variável Y
(coloca em 1)
#define clr_bit(Y,bit_x) (Y&=~(1<<bit_x)) //limpa o bit x da variável Y
(coloca em 0)
#define tst_bit(Y,bit_x) (Y&(1<<bit_x)) //testa o bit x da variável Y
(retorna 0 ou 1)
#define cpl_bit(Y,bit_x) (Y^=(1<<bit_x)) //troca o estado do bit x da
variável Y (complementa)
```

APÊNDICE B – Cabeçalho e definições de variáveis e constantes

```

/* *****
Aluno: Juliano de O. Pacheco/ Profº: Clóvis Antônio Petry /Profº: Flávio
Alberto B. Batista//
PWM monofásico e trifásico v1
*****/
#include "configpwm.h"
#include "usart1.h"
#include "definicoes.h"

#define BAUD 9600
#define MYUBRR F_CPU/16/BAUD-1
long int amostras;
int corrente, muda_corrente;
unsigned char i, j, h; // variaveis de leitura da tabela de senos
unsigned int a;
volatile unsigned char duty, duty_; //(a) escolha de opções// duty - razão cíclica
char digitos[5];
double dfreq; //Frequencia da senoide fundamental
//const double refclk=31372.549; // =16MHz / 510
//const double refclk=3921.6;

// variaveis usadas dentro da interrupção do timer0 declaradas como volatile
volatile char icnt;
volatile char icnt1;
volatile char c4ms; // contador incrementado a cada 4ms
volatile unsigned long phaccu; // acumulador de fase
volatile unsigned long tword_m; // dds tuning word m

// tabela do seno
const unsigned char seno[] PROGMEM = {127, 130, 133, 136, 140, 143, 146,
149, 152, 155, 158, 161, 164, 167, 170, 173, 176, 179, 182, 185, 187, 190, 193,
195, 198, 201, 203, 206, 208, 211, 213, 215, 217, 220, 222, 224, 226, 228, 230,
232, 233, 235, 237, 238, 240, 241, 242, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251,
252, 252, 253, 253, 254, 254, 254, 254, 255, 255, 254, 254, 254, 254, 253, 253,
252, 252, 251, 250, 250, 249, 248, 247, 246, 244, 243, 242, 240, 239, 237, 236,
234, 232, 231, 229, 227, 225, 223, 221, 219, 216, 214, 212, 209, 207, 204, 202,
199, 197, 194, 191, 189, 186, 183, 180, 177, 175, 172, 169, 166, 163, 160, 157,
154, 150, 147, 144, 141, 138, 135, 132, 129, 125, 122, 119, 116, 113, 110, 107,
104, 100, 97, 94, 91,88, 85, 82, 79, 77, 74, 71, 68, 65, 63, 60, 57, 55, 52, 50, 47,
45, 42, 40, 38, 35, 33, 31, 29, 27, 25, 23, 22, 20, 18, 17, 15, 14, 12, 11, 10, 8, 7,

```

6, 5, 4, 4, 3, 2, 2, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 2, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
12, 13, 14, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 37, 39, 41, 43, 46, 48, 51,
53, 56, 59, 61, 64, 67, 69, 72, 75, 78, 81, 84, 87, 90, 93, 96, 99, 102, 105, 108,
111, 114, 118, 121, 124, 127};

APÊNDICE C – Configuração dos Timers para a geração das saídas PWM

```

/*
 * configpwm.c
 *
 * Created: 14/07/2011 17:50:26
 * Author: Juliano
 */

#include "definicoes.h"
#include "configpwm.h"

void PWMmono(void)
{
    DDRB = ((1 << PB1) | (1 << PB2) | (1 << PB3));
           //pinos b3 b2 b1 como saidas          DDRD = ((1
<< PD3) | (1 << PD5) | (1 << PD6));
           //pinos d6 d5 d3 como saidas
    //T/C0 - MODO PWM FASE CORRIGIDA DE 8 BITS
    TCCR0A = ((1<<COM0A1)|(0<<COM0A0) | (1<<COM0B1) |
(1<<COM0B0) | (1<<WGM00) | (1<<WGM02) | (0<<WGM01)); // PWM)
    TCCR0B = (0<<CS02) | (1<<CS01) | (0<<CS00); //liga T/C0 8
prescaler

    //T/C1 - MODO PWM FASE CORRIGIDA DE 8 BITS
    TCCR1A = (1<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (1<<COM1B1) |
(1<<COM1B0) | (1<<WGM10);
    TCCR1B = (0<<CS12) | (1<<CS11) | (0<<CS10); //liga T/C0 8
prescaler
}
void PWMtri(void)
{
    DDRB = ((1 << PB1) | (1 << PB2) | (1 << PB3));
           //pinos b3 b2 b1 como saidas          DDRD = ((1
<< PD3) | (1 << PD5) | (1 << PD6));
           //pinos d6 d5 d3 como saidas

    //T/C0 - MODO PWM FASE CORRIGIDA DE 8 BITS
    TCCR0A = ((1<<COM0A1)|(0<<COM0A0) | (1<<COM0B1) |
(1<<COM0B0) | (1<<WGM00) | (1<<WGM02) | (0<<WGM01)); // PWM)
    TCCR0B = (0<<CS02) | (1<<CS01) | (0<<CS00); //liga T/C0 8
prescaler
}

```

```

//T/C1 - MODO PWM FASE CORRIGIDA DE 8 BITS
TCCR1A = (1<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (1<<COM1B1) |
(1<<COM1B0) | (1<<WGM10);
TCCR1B = (0<<CS12) | (1<<CS11) | (0<<CS10); //liga T/C0 8
prescaler
//T/C2 - MODO PWM FASE CORRIGIDA DE 8 BITS
TCCR2A = (1<<COM2A1) | (0<<COM2A0) | (1<<COM2B1) |
(1<<COM2B0) | (1<<WGM20); //seleção do modo PWM
TCCR2B = (0<<CS22) | (1<<CS21) | (0<<CS20); //liga T/C2 com
prescaler de 8
}
void DPWM(void) //Função para desligar as saidas PWMs
{
    DDRB = ((0 << PB1) | (0 << PB2) | (0 << PB3)) ;
//pinos b3 b2 b1 como saidas    DDRD = ((0
<< PD3) | (0 << PD5) | (0 << PD6)) ;
    TCCR0A = ((0 <<COM0A1) | (0 <<COM0A0));
    TCCR1A = ((0 <<COM1A1) | (0 <<COM1A0) | (0<<COM1B1) | (0
<<COM0B0)) ;
    TCCR2A = ((0 <<COM2A1) | (0 <<COM2A0));
}

```

APÊNDICE D – Configuração da USART do Atmega168

```

/*
 * AVRGCC1.c
 *
 * Created: 08/09/2011 22:07:20
 * Author: Pacheco
 */

#include "definicoes.h"
#include "usart1.h"
#define BAUD 9600
#define MYUBRR F_CPU/16/BAUD-1

void USART_INIT(unsigned int ubrr)
{
    UBRR0H = (unsigned char)(ubrr>>8);
    UBRR0L = (unsigned char)ubrr;
    UCSR0B=0;
    UCSR0B |= (1<<RXEN0);           //RXEN0:           Receiver
    Enable
    UCSR0B |= (1<<TXEN0);           //TXEN0:
    UCSR0C = 0;
    UCSR0C |= (1<<UCSZ01);          //UCSZ01:        Character Size
    UCSR0C |= (1<<UCSZ00);          //UCSZ00:
}
void USART_TRANS(unsigned char dado)
{
    while ( !( UCSR0A & (1<<UDRE0) ));
    UDR0 = dado;
}
unsigned char USART_READ( void )
{
    while (!(UCSR0A & (1<<RXC0)));
    return UDR0;
}
void USART_TRANS_SRT(char *t)
{
    while(*t!=0)
    {
        USART_TRANS(*t++);
    }
}

```

```

    }
}
void menu(void)
{
    USART_READ();
    USART_TRANS_SRT("\n\r");
    USART_TRANS_SRT("PRIMEIRA VERSAO DO
INVERSOR\n\n\r");
    USART_TRANS_SRT("Opção 0 = PWM Monofásico Três
Níveis\n\n\r");
    // USART_TRANS_SRT("Opção 1 = PWM Monofásico Para
Motor em Split Phase\n\n\r");
    // USART_TRANS_SRT("Opção 2 = PWM Inversão de
Rotação do Motor em Split Phase\n\n\r");
    USART_TRANS_SRT("Opção 1 = PWM Trifásico sentido
anti-horário\n\n\r");
    USART_TRANS_SRT("Opção 2 = PWM Trifásico sentido
horário\n\n\r");
    USART_TRANS_SRT("Opção 3 = Desligado\n\n\r");
    USART_TRANS_SRT("Opção p = valor de corrente\n\n\r");
}

```

APÊNDICE E – Funções chamadas no laço principal

```

void ident_num(unsigned int valor)//converte um nr. decimal nos seus digitos
individuais
{
    digitos[0]=0;
    digitos[1]=0;
    digitos[2]=0;
    digitos[3]=0;
    digitos[4]=0;
    unsigned char k=0;
    do{
        digitos[k] = valor%10; //pega o resto da divisao/10 e salva
no digito correspondente
        valor /=10; //pega o inteiro da divisao/10
        k++;
    }
    while (valor!=0); //o tipo da variável valor pode ser alterado
}
void initADC(void)
{
    ADMUX = (1<<REFS0)|(1<<ADLAR); //tensão externa no pino aref,
canal 0 e valores em ADCH
    ADCSRA = (1<<ADPS1)|(1<<ADPS0); // preescaler para AD valor 8.
16ms/13/preescaler=160 medições em 1MHz
    ADMUX = 1<<REFS0; //AVcc com cap. externo no pino VRef
    DIDR0 = 1;//desabilita input digital ADC0
    ADCSRA |= 1<<ADSC;
}
void rampa_up(void)
{
    volatile unsigned char temp=10; duty_=25;

    while(temp)
    {
        duty_++;
        _delay_ms(500);
        temp--;
        duty=duty_;
        if(duty_>100)
        {
            duty=100;

```

```

        break;
    }
}
void rampa_down(void)
{
    volatile unsigned char temp=30;

    while(temp)
    {
        duty--;
        _delay_ms(500);
        temp--;
        duty=duty_;
        if(duty_==0)
        {
            duty=0;
            _delay_ms(1000);
            DPWM();
            break;
        }
    }
}
ISR(TIMER0_OVF_vect) // interrupção do timer T/C0 para leitura da tabela
de senos
{
    phaccu=phaccu+tword_m; // soft DDS, phase accu with 32 bits
    icnt=phaccu >> 24; // use upper 8 bits for phase accu as frequency
information

    OCR0A=((pgm_read_byte_near(seno + (uint8_t)(icnt +
i)))*duty)/100; OCR0B=((pgm_read_byte_near(seno + (uint8_t)(icnt +
i)))*duty)/100;
    OCR1A=((pgm_read_byte_near(seno + (uint8_t)(icnt +
j)))*duty)/100; OCR1B=((pgm_read_byte_near(seno + (uint8_t)(icnt +
j)))*duty)/100;
    OCR2A=((pgm_read_byte_near(seno + (uint8_t)(icnt +
h)))*duty)/100; OCR2B=((pgm_read_byte_near(seno + (uint8_t)(icnt +
h)))*duty)/100;
    if(icnt1++ == 125)
    { // incrementa a variavel c4ms a cada 4 ms
        c4ms++;
        icnt1=0;
    }
}

```

APÊNDICE F – Laço principal do *firmware* para o Atmega168

```

int main()
{
    int conversoes=0;
    amostras = conversoes;// Zera variáveis
    USART_INIT(MYUBRR);
    initADC();
    sbi (TIMSK0,TOIE0);          // habilita interrupção do timer 0
    dfreq=60;
    ADCSRA |= 1<<ADSC;

    tword_m=fma(pow(2,32),(dfreq/3921.6),0); // calulate DDS new tuning
word
    sei();

    while(1)
    {
        USART_TRANS(1);

        menu();
        USART_TRANS_SRT("\n\r");
        a=USART_READ();
        USART_TRANS(a);
        USART_TRANS_SRT("\n\r");
        switch (a)
        {
            case '0':
            {
                PWMmono();
                i=0, j=128, duty=100;
                USART_TRANS_SRT(("ligado
monofásico\n\r"));
                //rampa_up();
                set_bit(PORTB,PB3); //os pinos PB3 e
PD3 devem ficar em nivel logico 1 para que os
                set_bit(PORTD,PD3); //igbts do terceiro
braço inversor não entrem em condução
                break;
            }
            case '1':
            {

```

```

        PWMtri();
        i=0, j=85, h=170;

        rampa_up();

        _delay_ms(1000);
        USART_TRANS_SRT("ligado
trifasico\n\n\r");

        break;
    }
    case '2':
    {
        PWMtri();
        i=170, j=85, h=0;
        USART_TRANS_SRT("ligado
trifasico\n\n\r");

        rampa_up();
        break;
    }
    case '3': // Desliga saidas PWM
    {
        USART_TRANS_SRT("DESLIGADO\n\n\r\r");
        USART_TRANS_SRT("\n\n\r\r");
        rampa_down();
        _delay_ms(500);
        DPWM(); //função de desabilita pwm
        break;
    }
    case 'p':
    {
        ident_num(corrente);
        _delay_ms(1000);
        USART_TRANS_SRT("0,6 A\n\r");

        USART_TRANS(digitos[4]+48);
        USART_TRANS(digitos[3]+48);
        USART_TRANS(digitos[2]+48);
        USART_TRANS(digitos[1]+48);
        USART_TRANS(digitos[0]+48);
    }
}

```

```

        set_bit(ADCSRA,ADEN);
//habilita o conversor AD
        conversoes = 0;

        amostras = conversoes = 0;// Zera
variáveis
        set_bit(ADCSRA,ADEN);//habilita AD

        while(conversoes < 250)
        {
            set_bit(ADCSRA,ADSC);
            while(tst_bit(ADCSRA,ADSC))
            muda_corrente = (ADCH - 127);
            if(muda_corrente < 0)
muda_corrente = ((~muda_corrente) + 1);
            amostras = (amostras + muda_corrente);
            conversoes++;
        }
        corrente = ((amostras / 250)*9);
        if(corrente <= 60) corrente = 0;
    }
}

```

APÊNDICE G – Código em PHP para comunicação via WEB

```
<html>
<head>
<title>Controle de Inversor de Frequência com Arduino</title>
</head>
<style type="text/css">
#corpo{
    background: url(prototipo.jpg) repeat center;
    width:654 px;
    height: 400 px;
    text-align: center;
}
.title{
    font-family: georgia;
    font-style: oblique;
    font-weight:bold;
    text-align: center;
    margin: 30px 0 30px 0 ;
}
#corpo img{
    width: 28px;
```

```

        height:28px;

        text-align: right;

        cursor:pointer;

    }

#corpo tr{

        font-family: georgia;

        font-style: oblique;

    }

</style> <body>



<div id="corpo">

<input type="hidden" name="estado">

        <table border="0" cellpadding="0" align="center"
style="background-color:white;margin-top:60px;" width="80%"
height="70%">

                <tr>

                        <td align="right">                <div align="right"
style="position:absolute;margin: 0px 0 5px -60px"> '></div>

                </td>

                </tr>

                <?php

                //coment simplespot

```

```

#comente

ini_set('display_errors', 'On');

exec("mode com3: BAUD=9600 PARITY=N data=8
stop=1 xon=off");

$portAddress = 'COM3';

$port = fopen($portAddress, 'w+');

if ($_POST['estado']=='mono')
{
    sleep(1);
    for($i=0;$i<2;$i++)
    {
        fwrite($port, '0');
    }
}

if ($_POST['estado']=='tri')
{
    sleep(1);
    for($i=0;$i<2;$i++)
    {
        fwrite($port, '1');
    }

    echo ' <tr> <td align="center">Motor    Trifásico    Ligado
Sentido Anti-Horário </td> </tr> ';

```

```

    }
if ($_POST['estado']=='triinv')
    {
        sleep(1);
        for($i=0;$i<2;$i++)
            {
                fwrite($port, '2');
            }
echo '<tr> <td align="center"> motor trifásico ligado sentido horário
</td> </tr> ';
}
if ($_POST['estado']=='desliga')
    {
        sleep(1);
        for($i=0;$i<2;$i++)
            {
                fwrite($port, '3');
            }
        sleep(1);
echo '<tr> <td align="center"> desligando </td> </tr> ';
sleep(40);
echo '<tr> <td align="center"> desligado </td> </tr> ';

```

```

    }

if($_POST['estado']=='corrente')
    {
        sleep(1);

        for($i=0;$i<2;$i++)
            {
                fwrite($port,'p');
            }

        sleep(2);

        echo '<tr> <td align="center">
retorno porta' .fgets($port);

        echo '<br> retorno porta' .fgets($port)."
</td></tr>";

    }

//sleep(1);

/*while(!feof($port))
    {

        echo '<br> retorno porta' .fgets($port,4096);

    }*/

```

```
sleep(1);  
//echo '<br> retorno porta - '.fgets($port);  
fclose($port);  
unset($port);  
//fclose($port);
```

```
?>
```

```
</table> </div> </body> </html>
```

APÊNDICE H – Código em HTML para apresentação do site

```
<html>
<head>
<title>Controle de Inversor de Frequência com Arduino</title>
</head>
<script type="text/javascript">
function Submit(est){
    document.Frm.estado.value = est;
    document.Frm.submit();
}
</script>
<style type="text/css">
#corpo{
    background: url(prototipo.jpg) repeat center;
    width:654 px;
    height: 400 px;
    text-align: center;
}
.title{
    font-family: georgia;
    font-style: oblique;
```

```
font-weight:bold;
text-align: center;
margin: 30px 0 30px 0 ;
}
#corpo img{
width: 30px;
height: 30px;
text-align: righth;
cursor:pointer;
}
#corpo table tr{
margin: 10px 50px 50px 40px;
font-family: georgia;
font-style: oblique;
}
</style>
<body>

<div id="corpo" >
<form method="POST" action="teste.php" name="Frm">
<input type="hidden" name="estado">
```

```

<table border="0" cellpadding="0" align="center" style="background-
color:white;margin-top:60px;" width="80%" height="70%">

<tr align="center">

    <td colspan="2">

        <p class="title">Controle Virtual do Inversor de Frequência
</p> </td> </tr>

<tr align="center"> <td align="right" style="cursor:pointer">

    <?if(isset($estado) && $estado != 'desliga'){?>

    <?}else{?>

    <?}??>

</td>

<td align="left"> PWM Monofásico Três Níveis </td>

</tr>

<tr align="center"> <td align="right" style="cursor:pointer">

    <?if(isset($estado) && $estado != 'desliga'){?>

    <?}else{?>



    <?}??>

```

```

        </td>

        <td align="left"> PWM Trifásico </td> </tr> <tr
align="center"> <td align="right" style="cursor:pointer">
        <?if(isset($estado) && $estado != 'desliga'){ ?>

        <?}else{ ?>

        <?}?>

        </td>

                <td align="left"> PWM Trifásico Inversão de Rotação
</td>

        </tr>

        <tr align="center"> <td align="right" style="cursor:pointer">

        <?if(isset($estado) && $estado != 'desliga'){ ?>

        <?}else{ ?>

        <?}?>

</td> <td align="left"> Corrente </td> </tr>

        <tr align="center">

        <td align="right" style="cursor:pointer">

```

```
</td>
```

```
<td align="left"> Desliga </td>
```

```
</tr> </table> </form> </div> </body> </html>
```


APÊNDICE I – Diagrama esquemático do circuito de potência e seus circuitos auxiliares

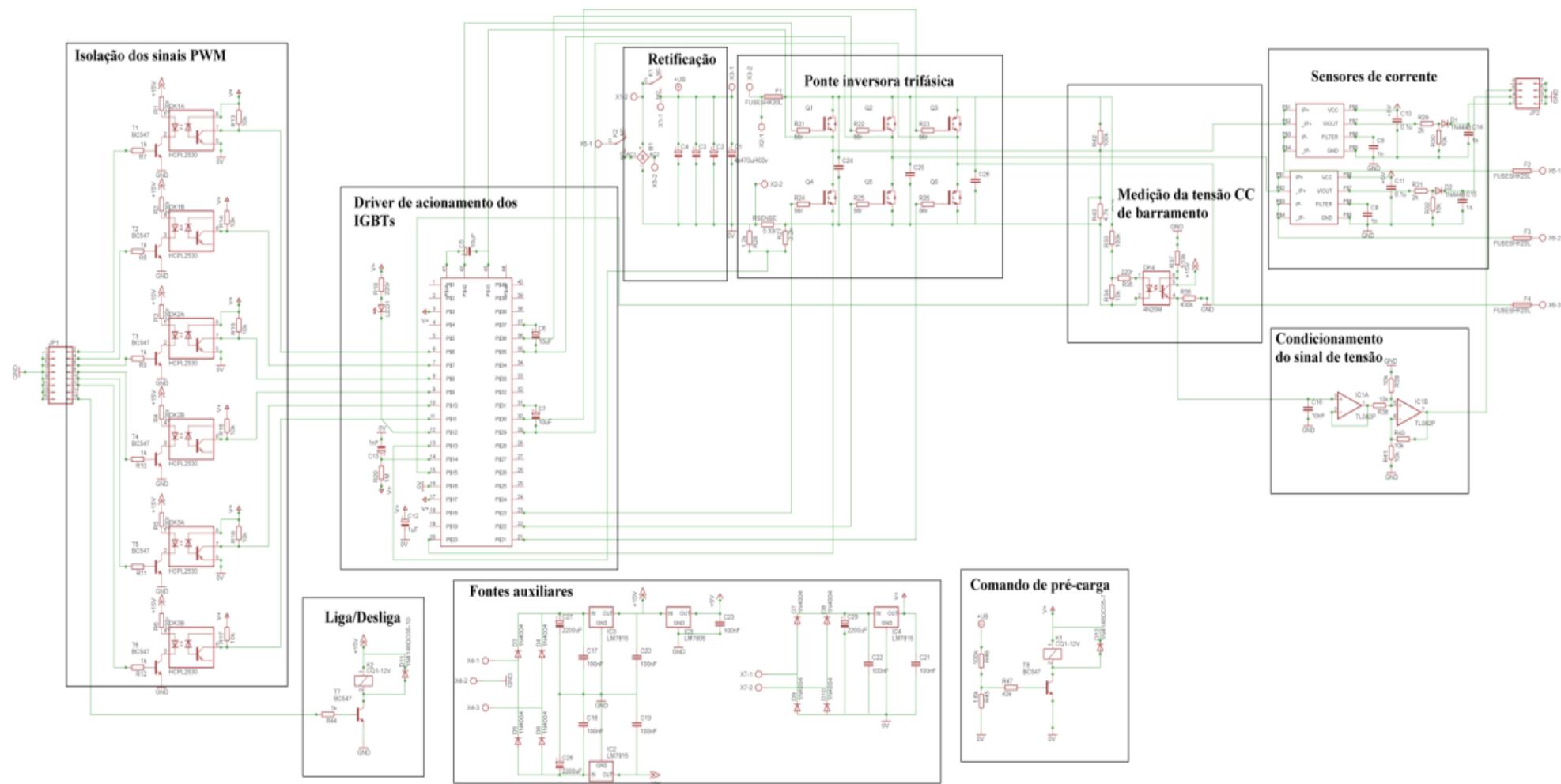


Figura 51 - Diagrama esquemático do conversor CC-CA e os seus circuitos auxiliares.