

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

WESLEY BALDIN DOS SANTOS

**ESTUDO, REPRODUÇÃO E ANÁLISE DE UM INVERSOR DE
TENSÃO EM PONTE COMPLETA CHAVEADO EM ALTA
FREQUÊNCIA COM SAÍDA SENOIDAL PURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2017

WESLEY BALDIN DOS SANTOS

**ESTUDO, REPRODUÇÃO E ANÁLISE DE UM INVERSOR DE
TENSÃO EM PONTE COMPLETA CHAVEADO EM ALTA
FREQUÊNCIA COM SAÍDA SENOIDAL PURA**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, do curso Superior de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon

CAMPO MOURÃO
2017

TERMO DE APROVAÇÃO
DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO
ESTUDO, REPRODUÇÃO E ANÁLISE DE UM INVERSOR DE
TENSÃO EM PONTE COMPLETA CHAVEADO EM ALTA
FREQUÊNCIA COM SAÍDA SENOIDAL PURA

por

Wesley Baldin dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 12 de Junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Eduardo Giometti Bertogna
(UTFPR)

Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo
(UTFPR)

Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon
(UTFPR)
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela presença em todos os momentos. Agradeço meus familiares pela ajuda e motivação durante todo esse trabalho. À minha namorada Maisa Rafaela por compreender e me apoiar em todos os momentos de dificuldades.

Agradeço aos professores pelos ensinamentos e conselhos que foram de grande ajuda para o trabalho, em especial o meu orientador Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon, onde me ajudou diretamente em todos os momentos, e em todas as etapas do trabalho. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Campo Mourão, pela disposição de sua estrutura e também de seu acervo bibliográfico.

Por fim, agradeço a meus colegas e amigos por todo incentivo e companheirismo oferecido.

A todos, muito obrigado.

RESUMO

SANTOS, Wesley Baldin. ESTUDO, REPRODUÇÃO E ANÁLISE DE UM INVERSOR DE TENSÃO EM PONTE COMPLETA CHAVEADO EM ALTA FREQUÊNCIA COM SAÍDA SENOIDAL

PURA. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

O presente trabalho, sobre conversão de energia CC-CA, tem como objetivo realizar a reprodução de um inversor do tipo fonte de tensão em módulos didáticos. O dispositivo inversor desenvolvido é constituído basicamente por quatro circuitos drives, um circuito de potência, um circuito de amostragem de tensão e por dois filtros de saída, no qual pretende-se manter o nível de tensão de saída na forma senoidal pura. De posse do modelo de referência, são projetados e confeccionados os protótipos para serem analisados individualmente. Contudo, serão apresentados resultados obtidos através de cada circuito, como também de todos os circuitos em conjunto.

Palavra-chave: Inversor de Tensão, Conversor CC-CA, Inversor em Ponte Completa, Forma de Saída Senoidal.

ABSTRACT

SANTOS, Wesley Baldin. STUDY, REPRODUCTION AND ANALYSIS OF A POWER INVERTER IN COMPLETE BRIDGE WITH SWITCHED HIGH FREQUENCY AND PURE SENOINAL OUTPUT. Final Paper Electronics Engineering Bachelor Degree, Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2017.

The present work, about power conversion CC-CA, has the objective perform a replication from a power inverter in didactic modules. The developed inverter device consists basically of four circuits drives, a power circuit, a voltage sampling circuit and two output filters, in which pretend to keep the output voltage level in pure sine form. In possession of the reference model, are designed and manufactured the prototypes to be analyzed individually. Also, results obtained through each circuit, and also all circuits together.

Palavra-chave: Power Inverter, CC-CA Converter, Full Bridge Inverter, Pure Sinusoidal Output Form.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Topologia off line.....	11
Figura 2 – Topologia interativo.....	11
Figura 3 – Topologia <i>on line</i>	12
Figura 4 – Topologias básicas.....	13
Figura 5 – Diagrama resumido.....	13
Figura 6 – Tipos de ondas.....	15
Figura 7 – Meia ponte.....	18
Figura 8 – Ponte completa.....	19
Figura 9 – Modos de condução.....	20
Figura 10 – Formas de onda	21
Figura 11 – PWM em momentos diferentes	21
Figura 12 – Diferentes <i>Duty Cycles</i>	22
Figura 13 – Largura do pulso	23
Figura 14 – SPWM bipolar	24
Figura 15 – Filtro LC comum.....	25
Figura 16 – Exemplos de snubbers. (a) Tipo RC, (b) Tipo RCD.....	26
Figura 17 – Circuito <i>Drive</i> das chaves.....	28
Figura 18 – Circuito <i>Snubber</i>	29
Figura 19 – Circuito de potência simplificado.....	34
Figura 20 – Circuito de amostragem de tensão.....	35
Figura 21 – Visual 3D do circuito <i>drive</i>	42
Figura 22 – Visual 3D do circuito de amostragem de tensão.....	42
Figura 23 – Visual 3D do circuito de potência.....	43
Figura 24 – Filtro de saída	43
Figura 25 – Circuitos <i>Drives</i>	44
Figura 26 – (a) Sinal PINV-1 de entrada, (b) Sinal PINV-2 de entrada.....	45
Figura 27 – (a) Sinal PINV-1 de saída, (b) Sinal PINV-2 de saída.....	45
Figura 28 – Circuito de potência	46
Figura 29 – Circuito de potência em funcionamento	47
Figura 30 – Medidas do circuito de potência	47
Figura 31 – Saída do circuito de potência com carga de $10k\Omega$	48
Figura 32 – Circuito de potência com 115VRMS	49
Figura 33 – Circuito de potência com 125VRMS	49
Figura 34 – Circuito de amostragem de tensão	50
Figura 35 – Circuito de amostragem de tensão à 90V em CA	50
Figura 36 – Circuito de amostragem de tensão à 127V em CA	51
Figura 37 – Partida Suave.....	51
Figura 38 – Comparação dos circuitos	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MOS	Metal óxido semicondutor
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
UPS	Fonte de alimentação ininterrupta
CM	Campo Mourão
SPWM	Modulação de largura de pulso senoidal
RMS	Raiz quadrática média
RL	Resistor e indutor
LC	Indutor e capacitor
E	Fonte de alimentação
V	Tensão elétrica
V_O	Tensão elétrica de saída
V_{in}	Tensão elétrica de entrada
Hz	Frequência em Hertz
S1	Elemento interruptor 1
S2	Elemento interruptor 2
S3	Elemento interruptor 3
S4	Elemento interruptor 4
D1	Diodo 1
D2	Diodo 2
D3	Diodo 3
D4	Diodo 4
d	Ciclo de trabalho
T	Período
T_{on}	Período ativo
i	Corrente elétrica
P	Potência
J	Joule

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistência elétrica
π	Número pi (3,141592)
\triangle	Diferença entre duas variáveis
μ	Número 10^{-6}
η	Número 10^{-9}

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA	10
1.2 PROBLEMA	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo Geral	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 INTRODUÇÃO AOS INVERSORES DE TENSÃO	18
2.2 TOPOLOGIA	18
2.2.1 Ponte Completa	19
2.3 MODULAÇÃO PWM	21
2.4 FILTRO DE SAÍDA	24
2.5 CIRCUITO SNUBBER	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 METODOLOGIA	27
3.3 PROJETO DOS DRIVES	28
3.4 PROJETO DO SNUBBER	29
3.5 CÁLCULO DE CORRENTE	30
3.6 DIMENSIONAMENTO DOS MOSFETS	32
3.7 CIRCUITO DE POTÊNCIA	33
3.8 CIRCUITO DE AMOSTRAGEM	34
3.9 CÁLCULO DO FILTRO DE SAÍDA	35
3.10 PROJETO DOS CIRCUITOS	41
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	44
4.1 DRIVES	44
4.2 CIRCUITO DE POTÊNCIA	46
4.3 VARIANDO A TENSÃO DO BARRAMENTO CC	48
4.4 CIRCUITO DE AMOSTRAGEM DE TENSÃO	49
4.5 PARTIDA DO INVERSOR	51
4.6 CIRCUITO COMPLETO	52
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS	54
 ANEXOS	 58
ANEXO A - NÚCLEOS DE FERRITE	59
ANEXO B - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO DRIVE	60
ANEXO C - LISTA DE MATERIAIS DO CIRCUITO DRIVE	61
ANEXO D - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA	62
ANEXO E - LISTA DE MATERIAIS DO CIRCUITO DE POTÊNCIA	63

ANEXO F - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO DE AMOS-	
TRAGEM DE TENSÃO	64
ANEXO G - LISTA DE MATERIAIS DO CIRCUITO DE AMOS-	
TRAGEM DE TENSÃO	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A utilização de energia é necessária para realizar qualquer espécie de trabalho, por esse motivo diversas áreas do conhecimento possuem estudos sobre alguma forma de energia existente. No meio ambiente há diversas fontes de energia e elas podem ser, renováveis ou não renováveis, limpas ou sujas. Entretanto, para as fontes comuns de energia (Sol, vento, fluxo de água, vapor, combustíveis fósseis, etc.) existem maneiras para conversão de seus recursos, com muita eficiência, em energia elétrica. Contudo, estratégias para transporte, conversão, distribuição e controle da energia elétrica fazem parte do campo de atuação da eletrônica de potência (FERNANDES; GUARONGHI, 2016).

Historicamente, a Eletrônica de Potência teve grande evolução no fim dos anos 50 com a invenção do Tiristor, como também a invenção do transistor bipolar de junção sobre a direção do físico William Bradford Shockley (MEDEIROS FILHO, 2016). No entanto, os dispositivos híbridos como MOSFET e IGBT, formados através de transistores de efeito de campo juntamente com a tecnologia MOS (metal oxide semiconductor), foram desenvolvidos na década de 80, e assim, com características de alto desempenho proporcionaram forte desenvolvimento em dispositivos eletrônicos de potência, incluindo fontes chaveadas e inversores (POMILIO, 2016).

Os inversores, também conhecidos como conversores CC-CA, são definidos geralmente por dois tipos, os inversores tipo fonte de tensão e os inversores tipo fonte de corrente, onde o primeiro permite transformar a alimentação em fonte de tensão na forma de corrente contínua para tensão em forma de corrente alternada, e o segundo permite transformar a corrente contínua de sua alimentação em corrente alternada (POMILIO, 2014).

No entanto, os inversores de fonte de tensão tem grande importância para diversas aplicações tanto a residências quanto na indústria em geral. Algumas aplicações incluem sistemas de energia solar, energia eólica, sistemas de energia embarcados em meios de transportes marítimos e aéreos (lanchas, navios e aviões) e fontes de alimentação ininterruptas (UPS) ou *No-Break*, com observação na última aplicação, onde as estratégias de projeto utilizam o inversor de tensão como um dispositivo essencial. Para exemplificar as aplicações em *No-Break*, as topologias comuns utilizadas com presença de inversor, são:

- *No-Break off line*, no qual ocorre duas condições de operação, onde a chave S, apresentada na figura 1, permanece fechada enquanto a rede opera em situação normal, ou é aberta quando a alimentação da rede é interrompida, e com isso, inicia o funcionamento da malha onde está o conjunto carregador, bateria e inversor de tensão (GARCIA; CORTIZO, 2001);

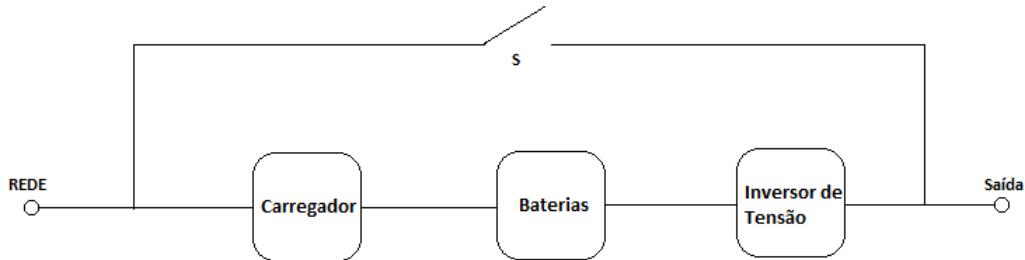


Figura 1 – Topologia off line
Fonte: Modificado de Schiavon (2007).

- *No-Break* interativo, onde há a presença de um módulo conversor, conforme figura 2, no qual um conversor CA-CC e um inversor de tensão trabalham em conjunto com a bateria de acordo com o estado de tensão da rede. Com rede ativa o módulo opera como conversor CA-CC para manter a bateria carregada, e com interrupção ou falha na rede o módulo se torna um inversor, e assim, fornece energia à carga. Interessante notar nessa topologia, como em topologia off line, a situação de cargas ligadas diretamente à rede, pois ela fica vulnerável a cargas com baixo fator de potência (SCHIAVON, 2007);

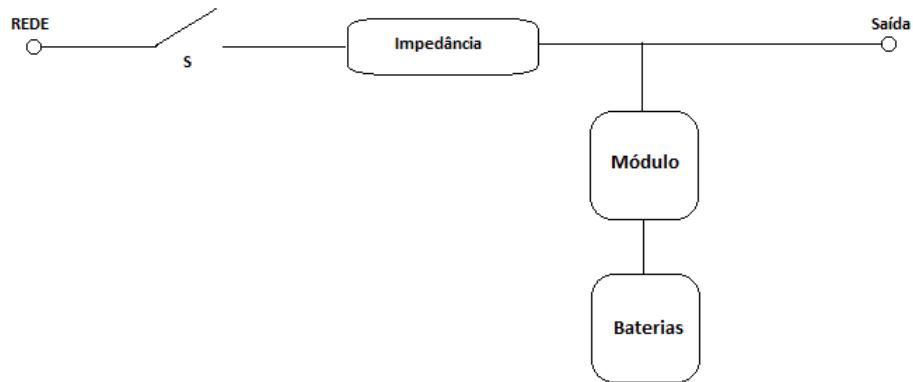


Figura 2 – Topologia interativo
Fonte: Modificado de Schiavon (2007).

- Topologia *on line*, no qual encontra-se duas condições de atuação com conversão de energia. Na primeira condição o retificador, apresentado na figura 3, opera como conversor de tensão CA da rede elétrica em tensão CC, em seguida, o inversor de tensão converte a tensão CC para tensão CA enquanto o carregador mantém a bateria em plena carga, sendo assim, esse primeiro estágio permanece ativo sempre que há tensão na rede com valores dentro do limite aceitável. Em situação de falha na rede acontece a segunda condição de operação, onde o inversor de tensão alimenta a saída através da energia fornecida pela bateria. E diferente das outras topologias citadas, não acontece em momento algum a ligação direta da carga com a rede, ou

seja, imperfeições da rede não são transmitidas à carga (SCHIAVON, 2007).

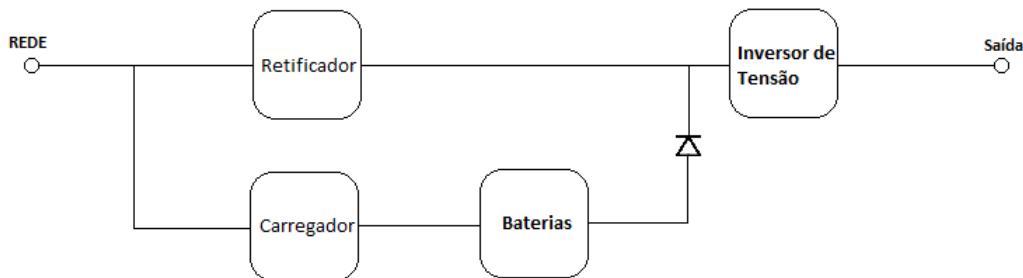


Figura 3 – Topologia *on line*
Fonte: Modificado de Schiavon (2007).

Com isso, nota-se a importância dos inversores de tensão, pois além de estabelecerem uma etapa fundamental no funcionamento do circuito, geralmente esses dispositivos situam-se em estágios finais nas aplicações. Entretanto, dentro do cenário atual é necessário o desenvolvimento de dispositivos de alta confiabilidade e alto desempenho. Sendo essas características possivelmente obtidas através de dispositivos semicondutores híbridos e métodos de chaveamento operando em alta frequência (CORRADI JUNIOR, 2011) .

Os circuitos dos inversores de tensão podem ser projetados basicamente por três diferentes topologias, conforme figura 4. Meia ponte monofásico, formado com apenas dois dispositivos semicondutores de potência, sendo esse, bastante utilizado em aplicações que não necessitam de muita potência. Ponte completa monofásico, composto essencialmente por quatro semicondutores de potência. E ponte completa trifásico construído com o arranjo de seis semicondutores de potência com saída de tensão variável trifásica (AHMED, 2000). Assim, a topologia escolhida para o projeto foi ponte completa monofásico por ser apropriada para potência acima de 1 kVA e por proporcionar menores correntes nos dispositivos semicondutores (SCHIAVON, 2007).

A seguir serão apresentadas algumas das principais características dos inversores de tensão:

- Forma de Saída: Onda senoidal pura, onda senoidal modificada (aproximada) ou saída com onda quadrada;
- Potência de Saída: Depende da necessidade de aplicação;
- Topologias: Monofásico e trifásico;
- Nível de tensão de Saída: Geralmente 110 V, 127 V, 220 V, 380 V ou 480 V em corrente alternada;
- Nível de tensão de Entrada: Normalmente 12 V ou 24 V em corrente contínua;
- Frequência de saída: Normalmente fixada em 60Hz ou 400Hz (para aviões), no caso

de inversores de tensão, ou variável nos inversores de frequência.

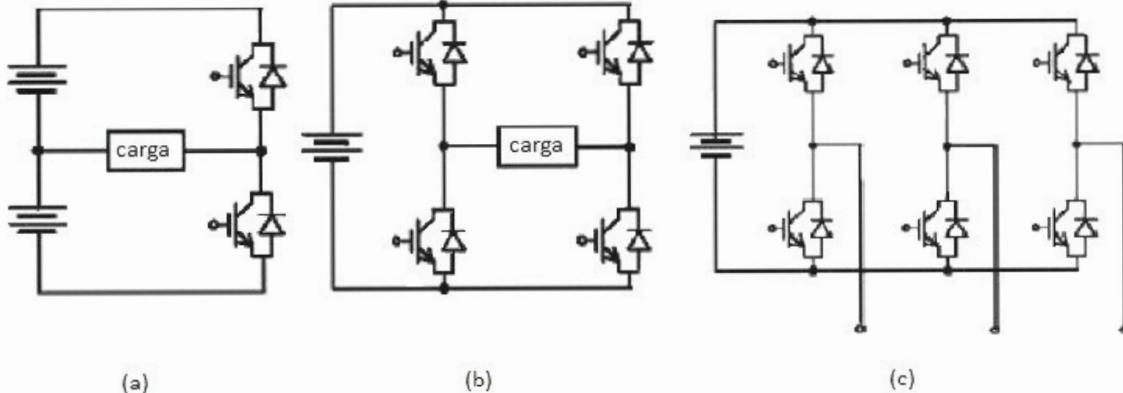


Figura 4 – Topologias básicas

(a) Meia ponte monofásico, (b) Ponte completa monofásico, (c) Ponte completa trifásico
Fonte: Adaptado de Bueno, Miranda e Borges (2007).

O sistema completo onde situa-se o inversor de tensão deste trabalho pode ser visualizado no diagrama abaixo, conforme figura 5, onde a região de cor amarela representa o inversor de tensão.

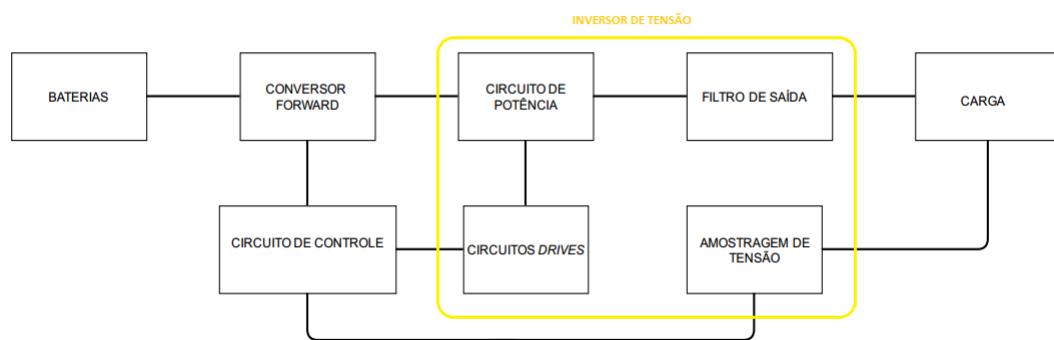


Figura 5 – Diagrama resumido
Fonte: Autoria própria.

Este trabalho visa o desenvolvimento de um inversor de tensão com saída senoidal pura, chaveado em alta frequência utilizando dispositivos híbridos. Com propósito de utilização como ferramenta didática ao ensino da Eletrônica de Potência na UTFPR-CM.

1.2 PROBLEMA

Qualidade de energia é um aspecto fundamental para diversos dispositivos, principalmente quando se trata de aplicações em que a necessidade de uma energia limpa e sem ruído é

primordial para o bom funcionamento. Segundo Paulilo (2017) uma forma para entender bem o conceito de qualidade de energia é pensar que a tensão ou corrente seja livre de desvios na magnitude, forma de onda e frequência. De forma geral, os dispositivos atuais estão mais sensíveis às variações da qualidade de energia em relação aos utilizados no passado, pois muitos contêm microprocessadores ou unidades de potência, entretanto, o problema maior é o mal funcionamento e a redução da vida útil, sobretudo em equipamentos como motores, geradores, transformadores, relés, entre outros. Além disso, ocorre aumento de interesse por parte dos consumidores em qualidade de energia, visto que estão bem informados e pressionando cada vez mais as concessionárias de energia.

Outro fator significante surge da utilidade em dispor módulos didáticos de eletrônica de potência para o curso de Engenharia Eletrônica do *campus* Campo Mourão, pois será aproveitável para alunos de eletrônica de potência ou para aqueles com projetos relacionados, onde poderá visualizar em partes o funcionamento do inversor de tensão.

1.3 JUSTIFICATIVA

O dispositivo inversor de tensão que possui em sua saída uma tensão CA com forma de onda senoidal pura, conforme se pode observar na figura 6 (a), opera todos os tipos de equipamentos que precisam de alimentação de tensão CA de boa qualidade. Sua distorção harmônica total de tensão (THDv) fica entre 1 a 5%, desse modo, pode-se aplicar a alimentação na forma de onda senoidal pura em cargas denominadas críticas, pois necessitam de energia de boa qualidade, visto que ocorrência de falha pode ocasionar prejuízo aos beneficiários (PEREIRA, 2003). Tensão na forma senoidal pura também é indicada para aparelhos de som, vídeo e motores elétricos, no qual evitam ruídos e aquecimentos indesejáveis. Já, a tensão na forma de onda senoidal aproximada possui qualidade abaixo da forma de onda senoidal pura, porém consegue alimentar a maioria dos equipamentos domésticos, bem como computador, monitor de vídeo e notebook com eficiência boa, dado que apresenta THDv em torno de 15 a 35%. Por fim, a tensão em forma de onda quadrada apresenta a pior eficiência comparada com as demais, uma vez que a THDv fica em torno de 60 a 80%, e seu uso é irregular a várias aplicações, inclusive em cargas industriais (SCHIAVON, 2007).

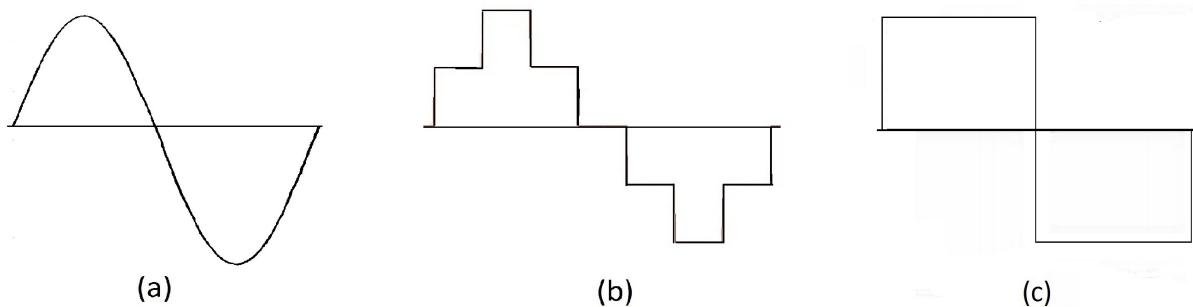


Figura 6 – Tipos de ondas
(a) senoidal pura, (b) senoidal aproximada, (c) onda quadrada
Fonte: Autoria própria.

Um fator importante para o ensino de eletrônica de potência no âmbito acadêmico são aulas práticas, pois proporcionam o contato físico do aluno com os dispositivos estudados em sala de aula. Assim, esse trabalho visa tornar possível aos acadêmicos, da UTFPR-CM, o acesso ao dispositivo inversor de tensão, composto por diversas placas didáticas, no qual será possível observar o funcionamento dos estágios do inversor de tensão individualmente.

1.4 OBJETIVOS

O trabalho consiste em uma reprodução e análise do projeto de inversor de tensão incorporado à um *no break* de (Schiavon, 2007) no âmbito da eletrônica de potência, no qual seus objetivos estão divididos em objetivo geral e, objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo teórico sobre inversor de tensão em ponte completa com saída senoidal pura, chaveado em altas frequências, modulação SPWM, projeto computacional e reprodução do inversor de tensão, cuja este integra o *no break* de (Schiavon, 2007), dividido em diversas placas para fins didáticos.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Levantar a fundamentação teórica acerca do tema inversores de tensão em ponte completa;

- Projetar os circuitos com auxílio do Software Proteus 8;
- Desenvolver protótipos dos circuitos pertencentes ao projeto;
- Implementar o projeto em módulos para fins didáticos;
- Colocar em prática os circuitos para observação dos resultados;
- Promover testes e ajustes finais com finalidade em dispor o trabalho para uso na Universidade.

1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para a realização do trabalho foi necessário o desenvolvimento de várias etapas. A princípio foi elaborado uma pesquisa bibliográfica, em continuidade, projetos, confecção dos protótipos, testes e análise dos resultados. De grande importância para a conclusão trabalho, os recursos presentes na UTFPR-CM são frequentemente utilizados durante todas as etapas.

A etapa de pesquisa tem como objetivo a revisão bibliográfica sobre o assunto. Levantamento de teorias bases com finalidade de compreender todo o processo envolvido, com auxílio de materiais disponíveis na instituição, e em outras universidades, bem como outras fontes disponíveis em acervos e trabalhos relacionados na área.

Em seguida ocorre o desenvolvimento de projetos em software, para a visualização prévia dos resultados e alterações iniciais. Como também, a realização geral dos projetos, em que define as características técnicas, como dimensionamento e escolha de componentes com base na disponibilidade do mercado.

A etapa de confecção dos protótipos foi responsável por implementar na prática os resultados das etapas anteriores. Nessa parte do trabalho realiza-se o projeto físico dos elementos envolvidos no estudo, no âmbito de instalações concedidas pela instituição UTFPR-CM.

Posteriormente, testes são efetuados para examinar o funcionamento e eficiência do projeto, bem como coleta de informações de todos os elementos presentes no trabalho para futura análise.

Por fim, na última etapa as informações coletadas, através da etapa de teste, são estudadas a propósito de verificar se os objetivos iniciais foram concluídos com grau de eficiência desejado. E assim, promover o encerramento do trabalho.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. O primeiro consiste em acontecimentos históricos, introdução, objetivos e procedimentos metodológicos. O segundo capítulo traz a fundamentação teórica necessária para explicar o funcionamento do circuito e as metodologias

utilizadas para realizar o projeto. O terceiro capítulo oferece ênfase no processo de desenvolvimento prático dos módulos de potência, equacionamentos necessários e simulações. Entretanto, o quarto capítulo reúne o estudo dos resultados obtidos no capítulo anterior, para análise de funcionamento e eficiência. Por último, o quinto capítulo descreve o alcance dos objetivos e a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO AOS INVERSORES DE TENSÃO

Inversores são determinados por basicamente dois diferentes tipos, os inversores de corrente e inversores de tensão, sendo o primeiro alimentado com fonte de corrente e o segundo alimentado com fonte de tensão. Geralmente, os inversores de tensão são aplicados em UPS, enquanto os de corrente no controle de motores elétricos (GERENT, 2005). Porém, todos utilizam componentes interruptores de energia, e com isso, proporcionam boa eficiência para o projeto. Inversor de tensão, em sua função principal, converte tensão de uma fonte de tensão CC para uma forma de corrente alternada, e fornece energia para cargas com necessidade de alimentação com forma de onda senoidal ou com forma de onda aproximada de uma senoide (POMILIO, 2009).

2.2 TOPOLOGIA

O circuito básico para inversor de tensão, com uso de dois elementos interruptores, é chamado de meia ponte, apresentado na figura 7. Seu funcionamento consiste em alternar a passagem de corrente entre os interruptores, fazendo assim a carga receber alimentação positiva ou negativa, provindo de duas fontes CC (AHMED, 2000).

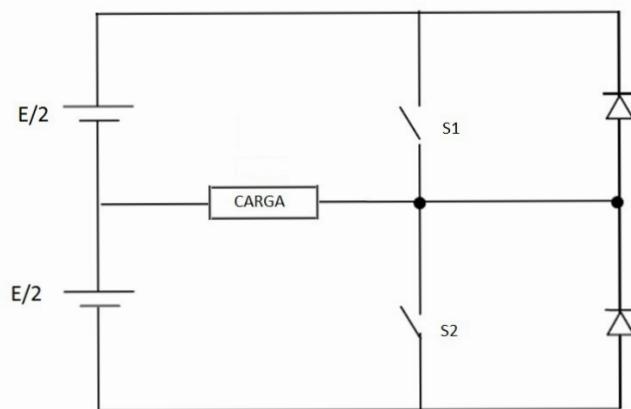


Figura 7 – Meia ponte
Fonte: Adaptado de Ahmed (2000).

No entanto, a amplitude de tensão na carga é referente à metade do valor das fontes, do circuito, ligadas em série, por exemplo, no uso de um circuito com fontes de valor 12 V cada, 24 V em série, tem-se um valor na carga de 12 V. Importante observar o uso dos diodos de retorno em paralelo com as chaves, pois eles são úteis quando há carga indutiva, onde não ocorre inversão instantânea de corrente na saída (AHMED, 2000).

2.2.1 Ponte Completa

Para o projeto, a topologia escolhida foi ponte completa, conforme figura 8, por permitir potência maior na carga. Ao comparar com o circuito meia ponte anterior, pode-se visualizar a carga alimentada com apenas uma fonte (E), ou seja, pode-se usar as duas fontes, disponíveis na topologia meia ponte, em série. Com isso, é possível obter o dobro de tensão na carga (HART 2001).

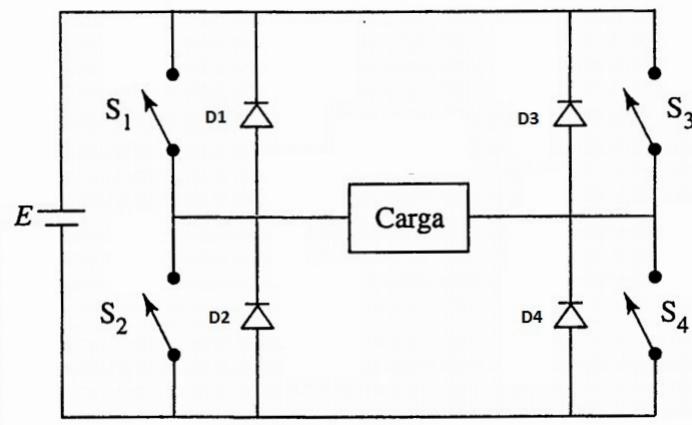


Figura 8 – Ponte completa
Fonte: Adaptado de Ahmed (2000).

O circuito é composto por quatro elementos interruptores e quatro diodos. Seu funcionamento, conforme se pode observar na figura 9, consiste em permitir passagem de corrente entre os elementos S_1 e S_4 , ou, S_2 e S_3 , e assim, promover alternância de polaridade de tensão na carga. Porém, é necessário um acionamento eficiente para realizar a comutação desses elementos, pois enquanto S_1 e S_4 conduzirem, S_2 e S_3 devem permanecer abertos, e o mesmo ocorre quando S_2 e S_3 conduzirem, fazendo S_1 e S_4 ficarem abertos. Contudo, uma característica importante é o tempo de permanência de cada estado, pois para manter um pico de tensão na carga com o mesmo valor da fonte, o período de permanência de cada estado deve ser o mesmo (AHMED, 2000).

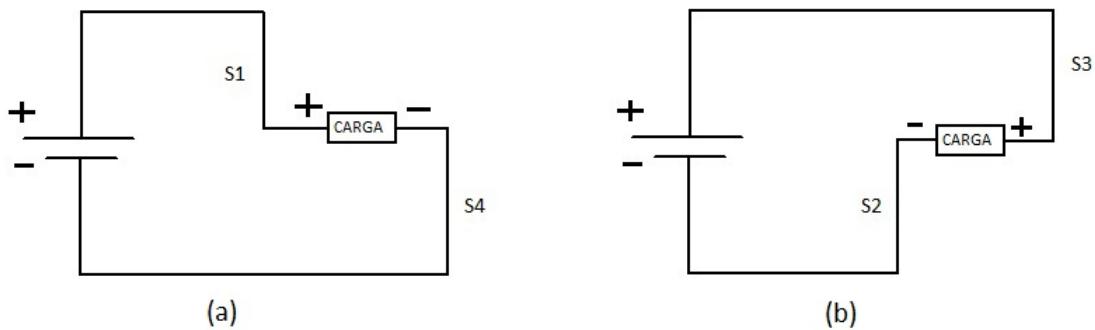


Figura 9 – Modos de condução
Condução de (a) S₁ e S₄, (b) S₂ e S₃
Fonte: Adaptado de Hart (2001).

Segundo (AHMED, 2000) o cálculo do valor RMS da tensão na saída para modulação por onda quase quadrada, é:

$$V_o(RMS) = E\sqrt{2d} \quad (2.1)$$

Sendo d o ciclo de trabalho,

$$d = \frac{T_{ON}}{T} \quad (2.2)$$

Onde, T_{ON} é o tempo em que as chaves permanecem conduzindo, e T o período total da onda de tensão na carga.

Para cargas com elementos indutivos (RL) os diodos fornecem o caminho de retorno para a corrente quando ocorre mudança de estado das chaves. Quando as chaves S_1 e S_4 se abrem e S_2 e S_3 se fecham, por consequência do indutor ainda há corrente no sentido anterior, entretanto, nesse caso os diodos D₂ e D₃ conduzem. E o mesmo acontece com os diodos D₁ e D₄, no momento em que os elementos S_2 e S_3 são desligados e S_1 e S_4 ligados (AHMED, 2000).

Na figura 10 é possível analisar corretamente a condução de corrente sobre elementos interruptores e diodos. Sendo, i_{S1} e i_{S4} as correntes que passam através dos elementos S₁ e S₄, como também, i_{S2} e i_{S3} as correntes que passam pelos elementos S₂ e S₃. Para os diodos tem-se, i_{D1} e i_{D4} como sendo correntes de retorno ao passarem através dos diodos D₁ e D₄, e i_{D2} e i_{D3} correntes de retorno ao passarem através dos diodos D₂ e D₃. Por último, o gráfico da corrente i_S no ramo onde está localizada a fonte (AHMED, 2000).

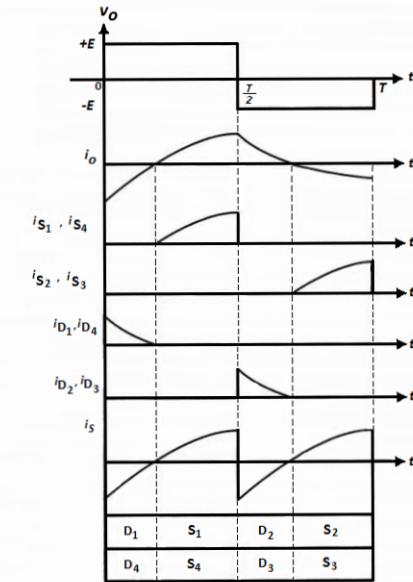


Figura 10 – Formas de onda
Fonte: Ahmed (2000).

2.3 MODULAÇÃO PWM

Com propósito de grande eficiência quanto ao funcionamento do inversor de tensão, a modulação é fundamental nesse aspecto, onde promove o controle e mudança de estados dos elementos interruptores. A modulação por largura de pulso desenvolve uma onda de frequência constante, com a largura do pulso variável, conforme figura 11, em que a onda contém a largura de pulso diferente a cada momento (VIVALDINI ,2009).

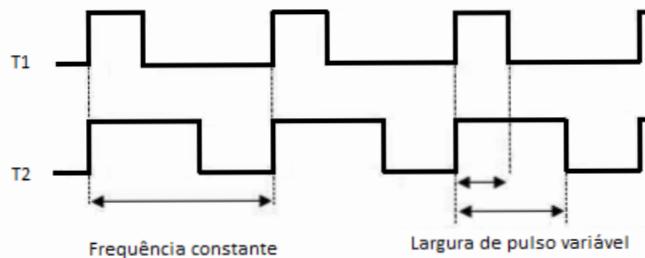


Figura 11 – PWM em momentos diferentes
Fonte: Adaptado de Vivaldini (2009).

A intenção em variar a largura do pulso é de controlar a tensão média entregue à carga, podendo assim dosar a energia transferida à carga e desta forma realizar controle de circuitos de potência ou velocidade de motores, entre outros. O ciclo ativo (também conhecido como *duty cycle*) define o tempo médio que o pulso ficou em nível alto em comparação com o período total, ou seja, um ciclo Ativo de 50% significa que o sinal ficou metade do tempo em nível alto e metade do tempo em nível baixo, conforme figura 12, (POMILIO, 1998).

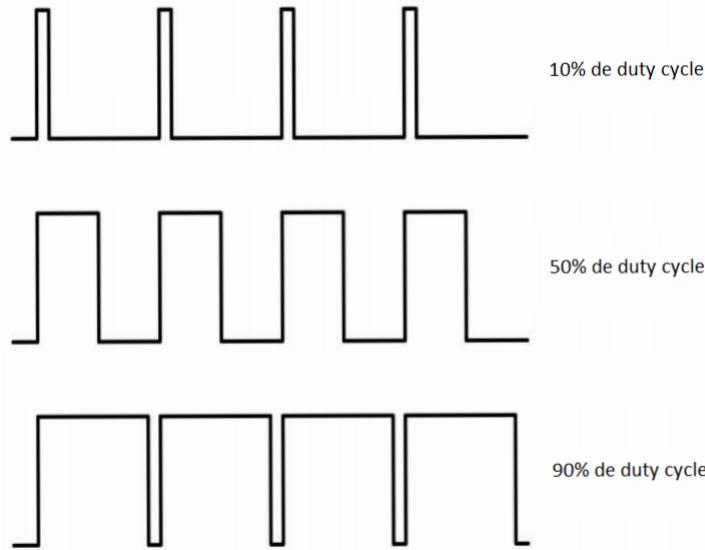


Figura 12 – Diferentes *Duty Cycles*

Fonte: Adaptado de Meca (2008).

Observando a teoria, segundo Vivaldini (2009), a tensão média de uma forma de onda V_{dc} é dada por:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (2.3)$$

onde T é o período da forma de onda e $V(t)$ é a variável temporal da tensão.

o PWM tem-se por:

$$V(t) = \begin{cases} V_{pulso} & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t_p < t \leq T \end{cases} \quad (2.4)$$

onde t_p é a duração do pulso e V_{pulso} é a tensão de pulso do sinal PWM, de acordo com figura 13.

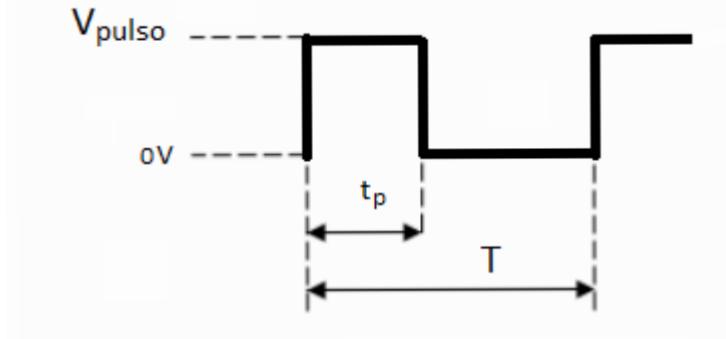


Figura 13 – Largura do pulso
Fonte: Adaptado de Vivaldini (2009).

Então,

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_p} V_{pulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right) \quad (2.5)$$

Portanto,

$$V_{dc} = \frac{t_p}{T} V_{pulso} \quad (2.6)$$

Como a razão entre a largura de pulso e o período da onda recebe o nome ciclo ativo (*duty cycle*), o pulso PWM apresenta a tensão média (V_{dc}) diretamente proporcional ao ciclo ativo, podendo variar entre $0V$ e V_{pulso} .

Tratando-se especialmente de inversores de tensão é comum encontrar diversas estratégias de modulação, entre elas:

- Modulação por deslocamento de fase, no qual sua finalidade é adiantar ou atrasar os pulsos de ativação dos elementos S1 e S4 ou S2 e S3 para que a saída fique um determinado tempo com tensão, significante, na carga e outro período com tensão nula ($0V$), e assim, ocasionar ajuste de tensão média na carga referente à esses tempos (BATSCHAUER, 2012);
- Modulação por largura de pulsos múltipla, onde, segundo (AHMED, 2000), são enviados pulsos com valor de tempo pequeno e com frequência alta para ativar e desativar as chaves várias vezes, e dessa forma, controlar a tensão média na carga através da largura e da frequência que ocorrem os pulsos;
- Modulação por largura de pulsos otimizada, em que otimiza-se a largura de pulsos através de cálculos, com objetivo de diminuir o número de pulsos na saída, ou seja, reduz o número de comutação, e com isso, encurta o número de harmônicas (inversor de tensão com saída senoidal controlado) (BATISTELA, 1994);
- Modulação por largura de pulsos senoidal, bastante utilizada devido à simplicidade. Seu princípio básico de funcionamento consiste em comparar uma onda senoidal provinda, geralmente, de um gerador senoidal simples, usado como referência, e uma onda triangular. Então, o número de pulsos nos elementos interruptores varia de acordo com a mudança de frequência da onda triangular, entretanto, não é comum realizar a variação de frequência dessa onda, pois

necessita projetar os elementos magnéticos considerando toda a faixa de frequência utilizada. Portanto, é desejável manter a frequência da onda triangular fixa, pois apenas com a variação de amplitude da onda senoidal é possível ajustar a largura de pulsos na saída do modulador, com vantagem de transferir o conteúdo harmônico para altas frequências (SCHIAVON, 2007).

Contudo, a técnica escolhida para o trabalho foi SPWM (modulação por largura de pulsos senoidal), tendo em vista sua simplicidade. No entanto, dentro dessa estratégia de modulação encontra-se disponível a técnica chamada de SPWM de dois níveis, também chamada de SPWM bipolar, apresentada na figura 14, em que usa-se o sinal fornecido pelo gerador senoidal como referência para realizar a comparação com a onda triangular, com isso, o pulso para a ativação das chaves, ou elementos interruptores, é gerado quando o valor do sinal de referência ultrapassa o valor da onda triangular (BATISTELA, 1994).

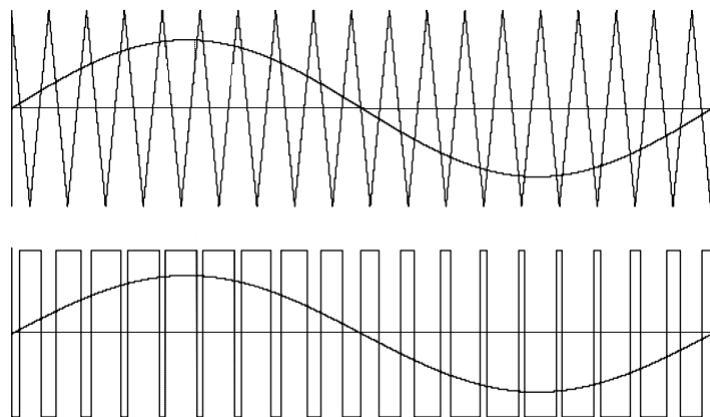


Figura 14 – SPWM bipolar
Fonte: Pinheiro Filho (2005).

2.4 FILTRO DE SAÍDA

O trabalho tem por objetivo fornecer à carga uma tensão na forma senoidal pura, com isso, é necessária a utilização de um filtro LC passa-baixa (indutor e capacitor) na saída, conforme figura 15, para eliminar as frequências altas e manter apenas a frequência de saída desejável (MICHELS; CAMARGO; BOTTERÓN, 2005).

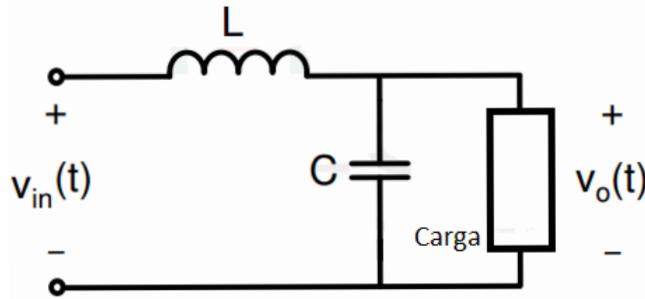


Figura 15 – Filtro LC comum
Fonte: Adaptado Rech (2016).

Onde, a função de transferência do filtro LC, segundo (MICHELS; CAMARGO; BOTTERÓN, 2005),

$$\frac{V_O(S)}{V_{in}(S)} = \frac{\frac{1}{LC}}{S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC}} \quad (2.7)$$

e,

$$\frac{V_O(S)}{V_{in}(S)} = \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\zeta\omega_0S + \omega_0^2} \quad (2.8)$$

onde,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

e,

$$\zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.10)$$

Sendo ω a frequência de corte do filtro, e ζ coeficiente de amortecimento.

Conforme (RECH, 2016), é importante observar o coeficiente de amortecimento, para que seu valor seja maior que 0,7, e assim, evitar grandes oscilações na frequência de corte, e menor do que 1 para evitar grandes defasagens. Como também, considerar a frequência de corte aproximadamente trinta vezes maior do que a frequência fundamental, onde o deslocamento de fase se aproxima de zero.

2.5 CIRCUITO SNUBBER

É primordial entre os objetivos da eletrônica de potência reduzir as perdas durante o funcionamento de um circuito. Dito isso, os circuitos snubbers reduzem a taxa de crescimento da corrente através dos interruptores na entrada em condução, e a taxa de crescimento da tensão sobre estes, durante o bloqueio. Contudo, estuda-se técnicas de chaveamento suave dos interruptores, como ZVS (comutação sob tensão nula), ZCS (comutação sob corrente nula), associação de conversores entre outras metodologias (LIMA; CRUZ; ANTUNES, 2004). Entretanto o controle dessas técnicas são sofisticadas e complexas, pois exigem um modelamento matemático e inúmeras variáveis. Sendo assim, uma boa forma de amortecer os níveis de tensão e corrente

sobre o transistor em um conversor chaveado é o projeto de circuitos amaciadores de tensão, figura 16, pois como os semicondutores possuem um tempo de atraso entre o sinal de controle e seu acionamento efetivo, parte das perdas está associada a este tempo, pois o transistor opera normalmente na região ativa. Ao adicionar o circuito reduz transientes da comutação, garantindo assim qualidade ao circuito e segurança aos componentes (HART, 2012).

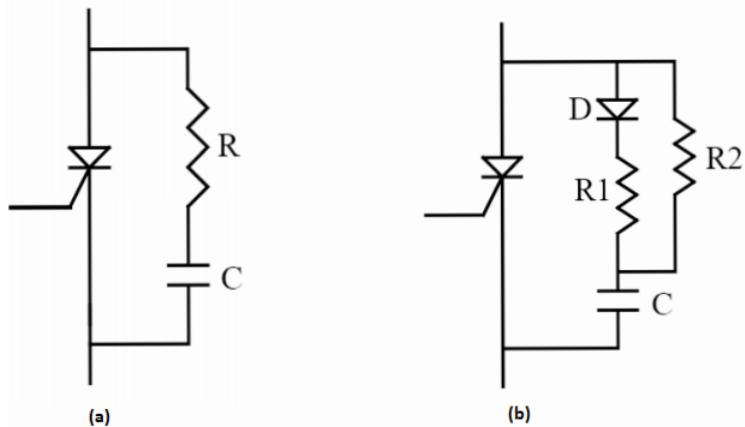


Figura 16 – Exemplos de snubbers. (a) Tipo RC, (b) Tipo RCD
Fonte: Adaptado de Simas (2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo faz a descrição de todos os métodos utilizados para o projeto dos módulos do inversor de tensão, e também a descrição dos materiais utilizados durante a realização do projeto.

3.2 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foi essencial obter uma base teórica para auxiliar em seu desenvolvimento. Desta forma, foi encontrado todos os valores necessários dos indutores e capacitores para os projetos, então os circuitos foram projetados, confeccionados e por fim os resultados obtidos foram analisados.

O trabalho foi dividido em etapas para que todos os objetivos fossem atingidos.

A primeira etapa integrou a revisão bibliográfica acerca do tema do trabalho, através de pesquisas em acervos disponíveis na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, bem como trabalhos acadêmicos de outras instituições. Outras fontes também foram examinadas, como revistas acadêmicas, artigos e datasheets de alguns componentes.

A segunda etapa foi designada ao dimensionamento e escolha dos componentes de acordo com o projeto de referência. Os componentes dimensionados foram o indutor, o capacitor, o circuito de snubber, e as chaves do inversor.

Na terceira etapa, foi feita a aquisição dos componentes e os protótipos dos circuitos projetados foram confeccionados.

Na quarta etapa os protótipos dos módulos desenvolvidos passaram por testes individuais. Esses testes verificaram o funcionamento de cada parte do inversor e também serviram para a coleta de dados, então foi realizado a montagem dos módulos, para assim, testar e coletar dados do inversor por completo.

A quinta etapa foi responsável por analisar os dados coletados na etapa anterior com a finalidade de verificar se os objetivos colocados no inicio do projeto foram alcançados com sucesso. Essa etapa também teve por objetivo encerrar o projeto, bem como as conclusões referentes a ele.

Abaixo, encontra-se a lista de equipamentos necessários para a alimentação e coleta de dados dos protótipos do projeto, sendo esses disponibilizados pela UTFPR-CM.

- Fonte de bancada Instrutherm FA – 3030 para alimentar os protótipos. Essa fonte possui duas saídas ajustáveis de até 30 V que podem ser utilizadas independentemente, em série

ou em paralelo, além de uma saída fixa de 5V.

- Dois osciloscópios Tektronix 2002B de 2 canais para visualizar e coletar os sinais e suas magnitudes.
- Três multímetros Minipa ET - 2042D para medição de tensões, correntes e continuidades nos circuitos ou componentes.
- Ponte LCR Minipa MX-1010 para medir a capacidade e indutância de alguns componentes.

3.3 PROJETO DOS DRIVES

Os *drives* das chaves, figura 17, tem o objetivo de isolar os pulsos provindo do circuito de controle SPWM, e assim fornecer a tensão e corrente necessárias para colocar as chaves em condução ou em corte ligeiramente.

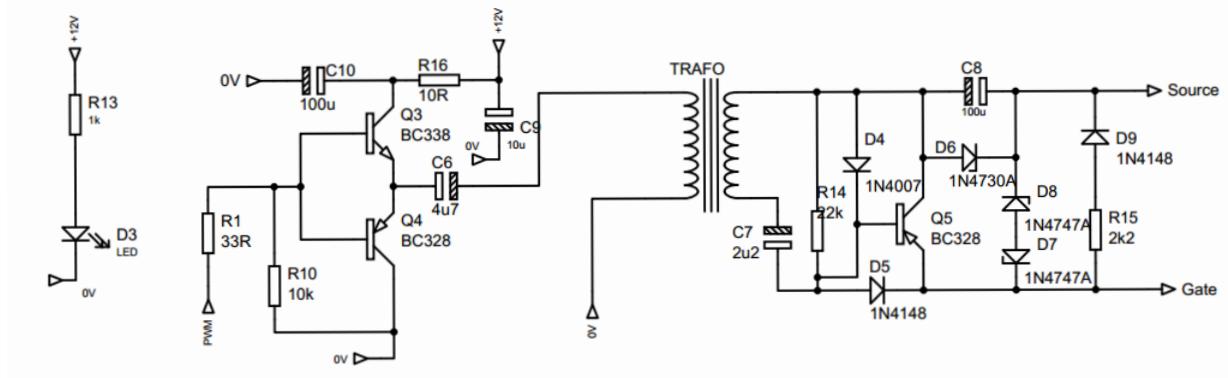


Figura 17 – Circuito Drive das chaves
Fonte: Modificado de Schiavon (2007).

Porém, na figura 17 temos apenas um circuito *drive* que se conecta à dois *mosfets*, e como o circuito contém oito *mosfets*, apresentado mais a frente, então foi necessário a confecção de quatro placas do circuito *drive*.

Na entrada do circuito tem-se o sinal SPWM originado do circuito de controle, e então encontra-se um transistor BC338 e um BC328, no qual o BC338 envia para o transformador, de relação 1:1, a tensão 12V quando o pulso SPWM tem valor positivo e o BC328 envia 0V quando o SPWM for negativo.

Para o circuito após o secundário do transformador encontra-se um transistor do tipo PNP que entra em saturação na desmagnetização do transformador e os diodos zener 1N4747 que garantem uma proteção contra transitórios superiores a 20V (SCHIAVON, 2007).

3.4 PROJETO DO SNUBBER

Para a proteção dos *Mosfets*, conforme Schiavon (2007), foi escolhido a topologia RCD passivo por razão de simplicidade, figura 18.

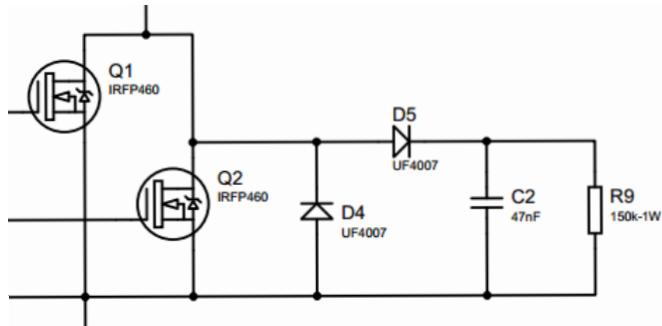


Figura 18 – Circuito Snubber
Fonte: Adaptado de Schiavon (2007).

Conforme Schiavon (2007), a equação utilizada para o dimensionamento do resistor é:

$$P = \frac{V_{max}^2}{R} \quad (3.1)$$

Então para uma dissipação de 1W e com o dobro do valor máximo da tensão de pico, tem-se:

$$R = \frac{V_{max}^2}{P} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{395^2}{1} \quad (3.3)$$

então,

$$R = 156k\Omega \quad (3.4)$$

Para o capacitor, deve-se dimensionar uma queda para 90% de sua tensão:

$$V_{vc1} = V_{vc0} \cdot e^{\frac{-1}{RC} \cdot t} \quad (3.5)$$

ou seja,

$$C = \frac{-t}{R \cdot \ln\left(\frac{V_{vc1}}{V_{vc0}}\right)} \quad (3.6)$$

para a frequência de 40khz,

$$C = \frac{-25\mu}{150k \cdot \ln(0,9)} \quad (3.7)$$

portanto,

$$C = 1,6\eta F \quad (3.8)$$

Então foi utilizado o capacitor de 47nF para ficar com bastante folga, e utilizado o diodo ultra rápido UF4007, no qual suporta 700V de tensão reversa.

3.5 CÁLCULO DE CORRENTE

Nessa fase, calcula-se a corrente no circuito de potência para uma carga puramente resistiva e adota-se uma potência de saída de 700W e tensão RMS de 115V (SCHIAVON, 2007).

De acordo com a equação,

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (3.9)$$

daí,

$$I_{RMS} = \frac{P}{V_{RMS}} \quad (3.10)$$

então,

$$I_{RMS} = \frac{700}{115} \quad (3.11)$$

portanto,

$$I_{RMS} = 6,086A \quad (3.12)$$

Entretanto, supondo um retificador como carga com potência de entrada de 700W e oscilação (*ripple*) de 10% e uma tensão de entrada de 115V, como no caso do *no break* de Schiavon (2007), tem-se uma tensão de pico de:

$$V_P = 115\sqrt{2} = 162,63V \quad (3.13)$$

E uma tensão de pico mínima de,

$$V_{min} = 0,9 \cdot V_P = 146,37V \quad (3.14)$$

Segundo Schiavon (2007), o cálculo da energia acumulada no capacitor em cada semi-ciclo é dada por:

$$\frac{W_{in}}{2} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_P^2 - V_{min}^2) \quad (3.15)$$

Como também pode ser dada por:

$$W_{in} = \frac{P_{in}}{f} \quad (3.16)$$

onde se tem,

$$C = \frac{P_{in}}{f.(V_P^2 - V_{min}^2)} \quad (3.17)$$

substituindo os valores,

$$C = \frac{700}{60.(162,63^2 - 146,37^2)} \quad (3.18)$$

então, a capacidade para a carga deve ser de:

$$C = 2322\mu F \quad (3.19)$$

Conforme equações vistas em Bolognini (2004), calcula-se o valor de corrente que os indutores devem suportar:

$$R = \frac{115^2}{700} \quad (3.20)$$

daí,

$$R = 18,89\Omega \quad (3.21)$$

sendo,

$$V_{ripple} = \frac{V_P}{2fCR} \quad (3.22)$$

então,

$$V_{ripple} = \frac{115\sqrt{2}}{2.60.2,2m.18,89} \quad (3.23)$$

$$V_{ripple} = 32,61V \quad (3.24)$$

para corrente máxima:

$$I_{Dmax} = I_L \cdot (1 + 2\pi \cdot \sqrt{\frac{V_p}{2 \cdot V_R}}) \quad (3.25)$$

substituindo valores,

$$I_{Dmax} = \frac{700}{115} \cdot (1 + 2\pi \cdot \sqrt{\frac{115 \cdot \sqrt{2}}{2.32, 61}}) \quad (3.26)$$

então,

$$I_{Dmax} = 66,48A \quad (3.27)$$

O tempo de carga pode ser dado pela equação a seguir (SCHIAVON, 2007):

$$t_c = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{V_{min}}{V_p}\right)}{2\pi f} \quad (3.28)$$

substituindo valores,

$$t_c = \frac{\cos^{-1}(0, 9)}{377} \quad (3.29)$$

daí,

$$t_c = 1,196ms \quad (3.30)$$

Por fim, para o cálculo da corrente de carga:

$$i_{chg} = \frac{C \cdot (V_p - V_{min})}{t_c} \quad (3.31)$$

substituindo valores,

$$i_{chg} = \frac{2322\mu \cdot (162,63 - 146,37)}{1,196m} \quad (3.32)$$

então,

$$i_{chg} = 31,56A \quad (3.33)$$

3.6 DIMENSIONAMENTO DOS MOSFETS

As chaves MOSFET usadas devem suportar a tensão máxima do barramento CC, de quase 400V. E a corrente RMS na carga, para uma carga resistiva máxima será em torno de 6 A, conforme o item 3.5, porém, cada uma das chaves conduzirá durante apenas metade do tempo, então a corrente média nas chaves é:

$$I_{med} = \frac{6,087}{2} = 3,04A \quad (3.34)$$

Sendo assim, para suportar a tensão e a corrente com bastante segurança foi utilizado dois *mosfets* IRFP460 em paralelo para cada chave do inversor, pois esse sustenta até 12A na temperatura de cem graus Celsius, conforme o Quadro 1.

	IRFP460	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1)	V _{DS}	V
Drain to Gate Voltage ($R_{GS} = 20k\Omega$) (Note 1)	V _{DGR}	V
Continuous Drain Current	I _D	A
$T_C = 100^\circ C$	I _D	A
Pulsed Drain Current (Note 3)	I _{DM}	A
Gate to Source Voltage	V _{GS}	V
Maximum Power Dissipation	P _D	W
Linear Derating Factor		W/ $^\circ C$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	E _{AS}	mJ
Operating and Storage Temperature	T _J , T _{STG}	-55 to 150 $^\circ C$
Maximum Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	T _L	$^\circ C$
Package Body for 10s, See Techbrief 334	T _{pkg}	$^\circ C$

Quadro 1 – Classificações máximas do IRFP460

Fonte: Adaptado de Fairchild (2017).

3.7 CIRCUITO DE POTÊNCIA

Para entender como funciona o circuito do inversor ponte completa com simplicidade, foi removido os circuitos *snubbers*, os filtros de saída e circuito para controle, conforme figura 19.

Importante salientar o uso de quatro *drives* no inversor, onde dois estão em mesma fase e outros dois estão defasados em cento e oitenta graus, ou seja, tem-se dois pares de drives, no qual cada par está defasado cento e oitenta graus em relação ao outro. Sendo assim, um par fica responsável para ativação das chaves T1 e T4, e o outro para T2 e T3. Desse modo, um par de *drives* recebe o sinal SPWM denominado PINV-1, enquanto o outro recebe um sinal SPWM PINV-2 originado do circuito de controle, conforme Schiavon (2007). Durante o pulso positivo de PINV-1 as chaves T1 e T4 são fechadas e as chaves T2 e T3 são mantidas abertas, logo após, quando PINV-2 mantém o pulso em nível de tensão positivo as chaves T2 e T3 são fechadas e as chaves T1 e T4 são mantidas abertas, alternando o valor do nível de tensão na carga de positivo para negativo. Isso resulta em uma forma de onda senoidal com frequência de 60Hz, e 115VRMS (SCHIAVON, 2007).

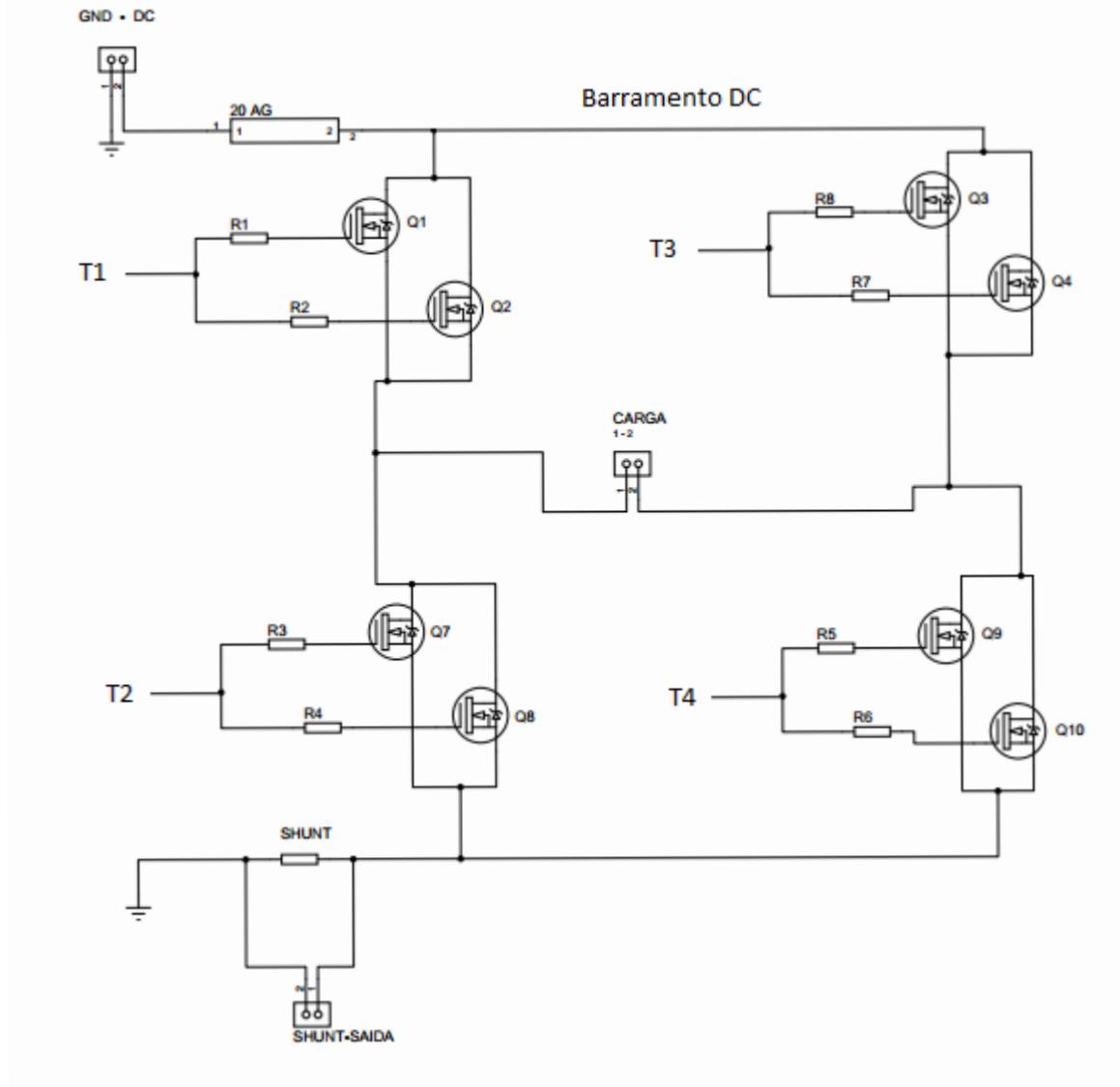


Figura 19 – Circuito de potência simplificado
Fonte: Adaptado de Schiavon (2007).

3.8 CIRCUITO DE AMOSTRAGEM

Com finalidade de monitorar constantemente o nível de tensão de saída do inversor, foi reproduzido o circuito de amostragem de tensão de forma modular, conforme figura 20, onde sua saída fica diretamente conectada à placa de controle de Schiavon (2007). Dessa forma, quando há ocorrência de falha na alimentação da carga, o circuito de controle, por meio do sinal proveniente do circuito de amostragem, atua para corrigir o erro e manter a qualidade de energia dentro dos limites determinados.

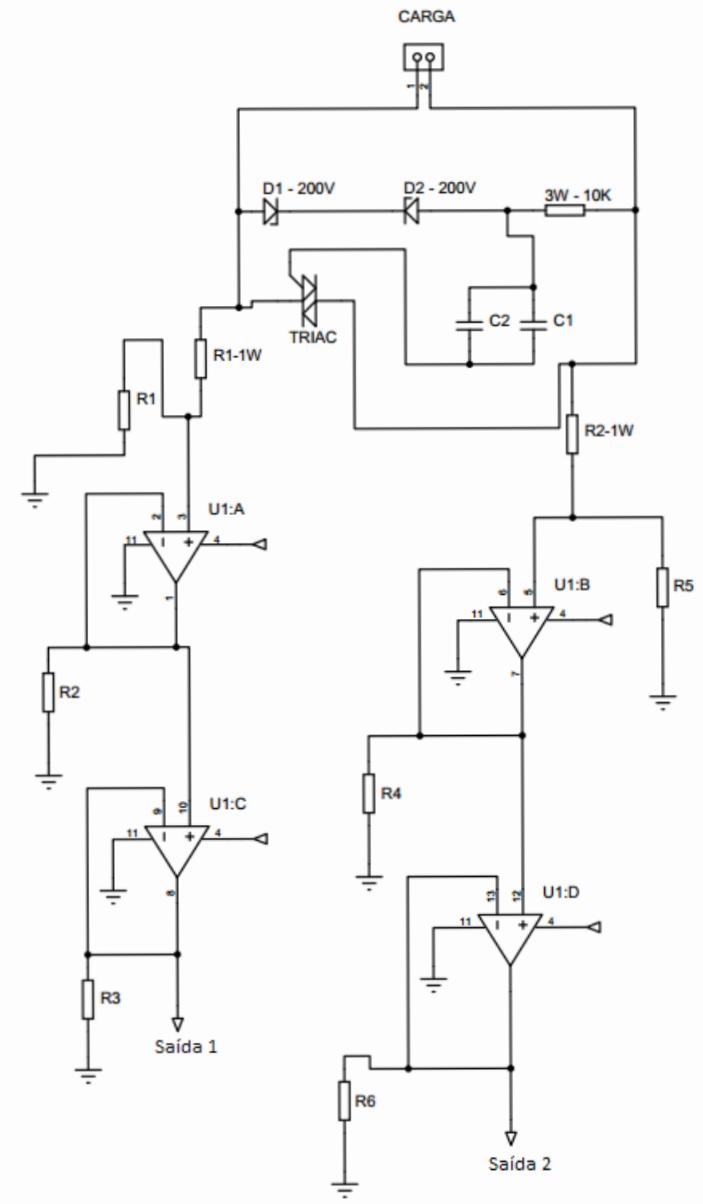


Figura 20 – Circuito de amostragem de tensão
Fonte: Adaptado de Schiavon (2007).

3.9 CÁLCULO DO FILTRO DE SAÍDA

O filtro de saída tem como objetivo eliminar a onda SPWM de 40kHz deixando passar a senoidal de 60Hz, modulada. Conforme Schiavon (2007), a frequência de corte adotada foi de oitenta vezes menor do que a frequência do sinal SPWM, ou seja, 500Hz. Dessa maneira, calcula-se o capacitor e o indutor do filtro para uma carga de 700W e com resistência de 18,89Ω :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \quad (3.35)$$

isolando LC,

$$L \cdot C = \left(\frac{1}{2\pi f_c} \right)^2 = 1,013 \cdot 10^{-7} \quad (3.36)$$

adota-se dois indutores de $500\mu\text{H}$ cada,

$$C = \frac{1,013 \cdot 10^{-7}}{L} \quad (3.37)$$

substituindo,

$$C = \frac{1,013 \cdot 10^{-7}}{1m} \quad (3.38)$$

então,

$$C = 101,3\mu\text{F} \quad (3.39)$$

Porém, foi utilizado quatro capacitores em paralelo de $16\mu\text{F}$ cada, no total de $64\mu\text{F}$. Então a nova frequência de corte passa a ser:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.500\mu \cdot 64\mu}} \quad (3.40)$$

portanto,

$$f_c = 629,11\text{Hz} \quad (3.41)$$

Com o valor da corrente máxima encontrada no item 3.5, da equação 3.27, calcula-se a energia que o núcleo deverá suporta, conforme Schiavon (2007):

$$E = \frac{1}{2} \cdot L_{ind} \cdot (i_{Dmax})^2 \quad (3.42)$$

substituindo,

$$E = \frac{1}{2} \cdot 1m \cdot (66,48)^2 \quad (3.43)$$

então,

$$E = 2,21J \quad (3.44)$$

A partir do cálculo da energia, pode-se fazer a escolha do núcleo, considerando um fator de utilização (ku) de 0,4, e uma variação de temperatura de 30°C , usa-se a tabela A.1 do anexo A, para o núcleo tipo EE e obtém-se a seguinte equação (BOLOGNINI, 2006):

$$kj = 63,35 \cdot \Delta T^{0,54} \quad (3.45)$$

substituindo,

$$kj = 63,35 \cdot 30^{0,54} = 397,55 \quad (3.46)$$

e o Ap (produto das áreas) do núcleo necessário, de acordo com Schiavon (2007):

$$Ap = \left(\frac{2 \cdot 10^4 \cdot E}{ku \cdot kj \cdot B} \right)^z \quad (3.47)$$

substituindo,

$$Ap = \left(\frac{2 \cdot 10^4 \cdot 2,21}{0,4 \cdot 397,0,35} \right)^{1,136} \quad (3.48)$$

então,

$$Ap = 1972 \text{ cm}^4 \quad (3.49)$$

Portanto, esse valor de Ap é inviável pelo seu tamanho físico, sendo assim, adota-se o seguinte núcleo EE65/33/26, conforme Schiavon (2007). Em sequência, é proposto uma carga com uma capacidade de $1000\mu\text{F}$, para então recalcular o núcleo:

$$V_{ripple} = \frac{V_p}{2fCR} \quad (3.50)$$

substituindo valores,

$$V_{ripple} = \frac{115\sqrt{2}}{2.60.1m.18,89} \quad (3.51)$$

então,

$$V_{ripple} = 152,63 \text{ V} \quad (3.52)$$

para a corrente máxima,

$$I_{Dmax} = I_L \cdot (1 + 2\pi \cdot \sqrt{\frac{V_p}{2 \cdot V_R}}) \quad (3.53)$$

substituindo valores,

$$I_{Dmax} = \frac{700}{115} \cdot (1 + 2\pi \cdot \sqrt{\frac{115\sqrt{2}}{2.152,63}}) \quad (3.54)$$

daí,

$$I_{Dmax} = 46,8 \quad (3.55)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \quad (3.56)$$

aumenta-se a frequênciade corte para 1681Hz (SCHIAVON, 2007),

$$L.C = \left(\frac{1}{2\pi f_c}\right)^2 \quad (3.57)$$

substituindo,

$$L.C = \left(\frac{1}{2\pi 1681}\right)^2 \quad (3.58)$$

então,

$$L.C = 8,96 \cdot 10^{-9} \quad (3.59)$$

e,

$$L = \frac{8,96 \cdot 10^{-9}}{64\mu} = 140\mu H \quad (3.60)$$

como são dois indutores,

$$L = 70\mu H \quad (3.61)$$

em continuidade,

$$E = \frac{1}{2} \cdot L_{ind} \cdot (i_{Dmax})^2 \quad (3.62)$$

substituindo valores,

$$E = \frac{1}{2} \cdot 70\mu \cdot (46,8)^2 \quad (3.63)$$

então,

$$E = 76,71 mJ \quad (3.64)$$

para novo AP,

$$Ap = \left(\frac{2 \cdot 10^4 \cdot E}{ku \cdot kj \cdot B}\right)^z \quad (3.65)$$

substituindo,

$$Ap = \left(\frac{2 \cdot 10^4 \cdot 76,71 m}{0,4397, 55,0, 35}\right)^{1,136} \quad (3.66)$$

tem-se novo Ap de:

$$Ap = 36,28 \text{ cm}^4 \quad (3.67)$$

e com isso, encontra-se $A_e = 5,25 \text{ cm}^2$ e $l_e = 14,7 \text{ cm}$. E conforme Schiavon (2007), calcula-se o fator de indutância:

$$A_l = \frac{A_e^2 \cdot B_{max}^2}{2 \cdot E} \quad (3.68)$$

substituindo valores,

$$A_l = \frac{(5,25 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 0,35^2}{2,76,71 \text{ m}} \quad (3.69)$$

então,

$$A_l = 220,07 \eta H / esp^2 \quad (3.70)$$

e para a largura do entre ferro,

$$\mu_e = \frac{A_l \cdot l_e}{\mu_0 \cdot A_e} \quad (3.71)$$

substituindo valores,

$$\mu_e = \frac{220,07 \eta \cdot 14,7 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5,25 \cdot 10^{-4}} \quad (3.72)$$

então,

$$\mu_e = 49,03 \quad (3.73)$$

portanto,

$$lg = \frac{l_e}{\mu_e} = \frac{14,7}{49,03} = 3 \text{ mm} \quad (3.74)$$

A seguir, tem-se o cálculo do número de espiras (SCHIAVON, 2007):

$$N = \sqrt{\frac{L_{ind}}{A_l}} \quad (3.75)$$

substituindo,

$$N = \sqrt{\frac{70\mu}{220,07\eta}} \quad (3.76)$$

então,

$$N = 17,83 esp \quad (3.77)$$

para densidade de corrente,

$$J = k_j \cdot A_p^{-0,12} \quad (3.78)$$

substituindo,

$$J = 397,55 \cdot 36,28^{-0,12} \quad (3.79)$$

então,

$$J = 301,78 A/cm^2 \quad (3.80)$$

A corrente RMS no indutor, conforme Schiavon (2007):

$$I_{RMS} = \frac{P}{V_{RMS}} \quad (3.81)$$

então,

$$I_{RMS} = \frac{700}{115} \quad (3.82)$$

portanto,

$$I_{RMS} = 6,086 A \quad (3.83)$$

então a área de cobre,

$$A_{cu} = \frac{I_{RMS}}{J} \quad (3.84)$$

substituindo,

$$A_{cu} = \frac{6,086}{301,78} \quad (3.85)$$

por fim,

$$A_{cu} = 0,02017 cm^2 \quad (3.86)$$

Portanto, após os cálculos realizados pode-se concluir um número de 10 fios do tipo 24 AWG (SCHIAVON, 2007).

A seguir, no quadro 2, apresenta-se o resumo dos parâmetros do filtro de saída.

Capacitor	64 μ F
Indutor	140 μ H
Freq. de corte	1681Hz
Núm. de espiras	17,83esp
Densidade de corrente	301A/cm ²
Largura do entre ferro	3mm
Área de cobre	0,020cm ²

Quadro 2 – Parâmetros do filtro de saída

Fonte: Autoria própria.

3.10 PROJETO DOS CIRCUITOS

Para a realização dos projetos foi utilizado o *software* Proteus, versão 8, pois possui área específica de layout, esquemáticos, visualização do circuito colorida e em três dimensões, entre outros recursos disponíveis.

O trabalho conta com quatro projetos de circuitos de dupla face para melhor aproveitamento de espaço. E os esquemáticos baseados em *no break* de Schiavon (2007).

Nota-se a ausência do transformador no circuito *drive*, conforme figura 21, isso se deve à inclusão dos conectores dos pinos do transformador, para proporcionar o encaixe rápido após a confecção das placas.

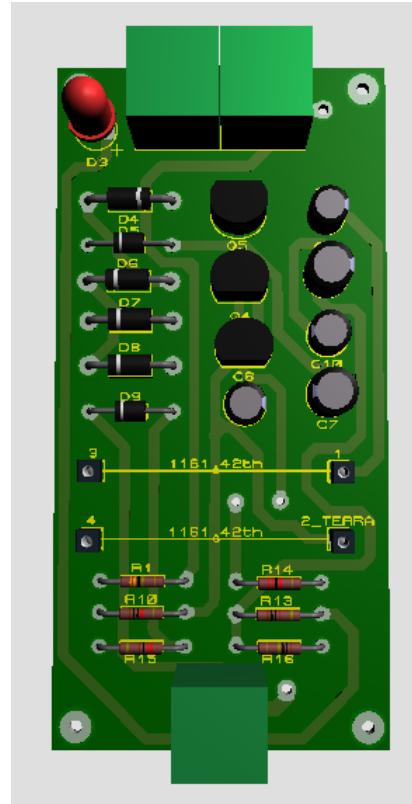


Figura 21 – Visual 3D do circuito *drive*
Fonte: Autoria própria.

Em continuidade, o projeto do circuito de amostragem de tensão, conforme figura 22.

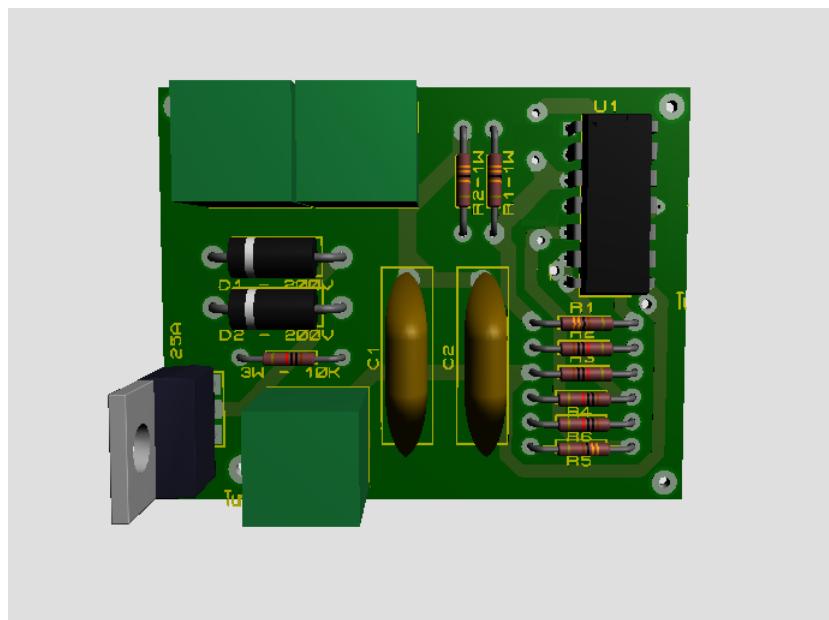


Figura 22 – Visual 3D do circuito de amostragem de tensão
Fonte: Autoria própria.

Circuito de potência, conforme figura 23. Porém, na prática houve alteração no posicionamento dos *mosfets*, onde a posição atual encontra-se abaixo da placa e sobre uma superfície de alumínio, para dissipação de calor, disponibilizada por UTFPR-CM.

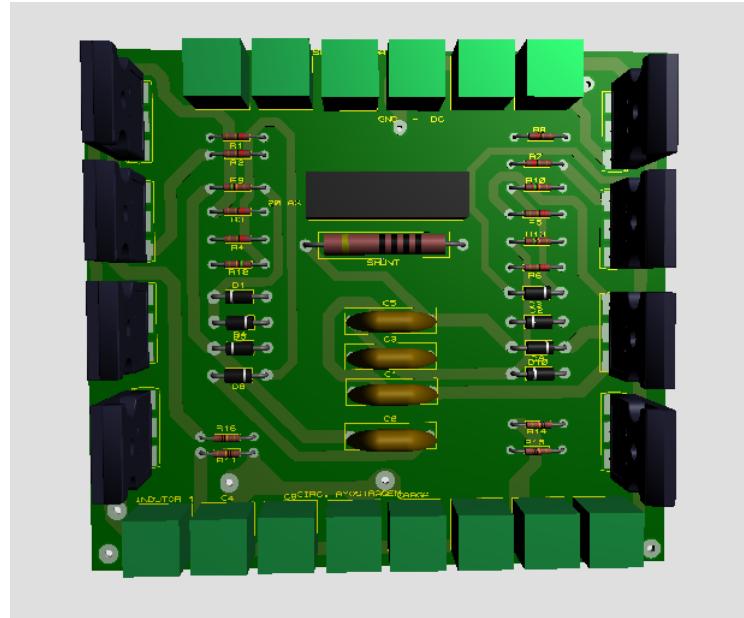


Figura 23 – Visual 3D do circuito de potência
Fonte: Autoria própria.

Por fim, tem-se a imagem do filtro de saída, na qual encontra-se duas placas separadas com um indutor de $500\mu\text{H}$ e dois capacitores de $16\mu\text{F}$, conforme o item 3.9, em cada placa. Nesse caso a placa de fibra de vidro tem o objetivo principal em apoiar os componentes para que fiquem fixados em sua superfície, figura 24, sendo assim, não é interessante apresentar o layout computacional pelo fato de sua simplicidade.

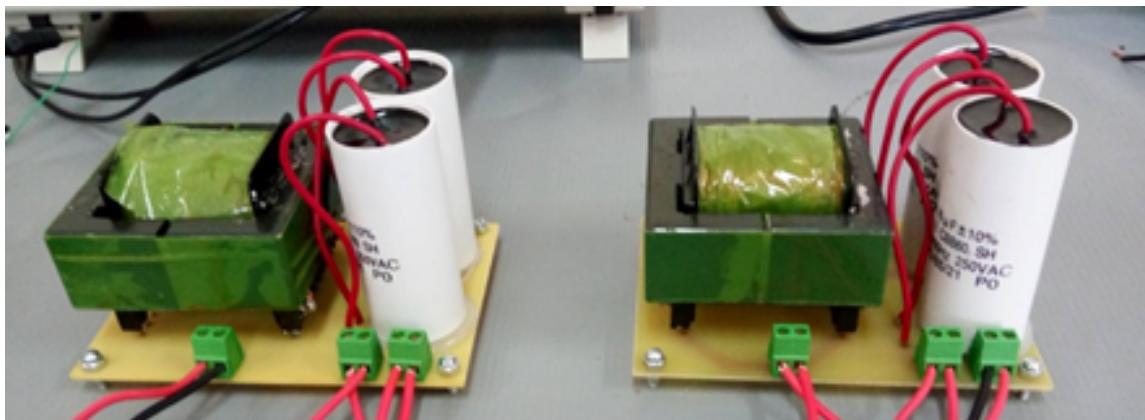


Figura 24 – Filtro de saída
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados experimentais realizados nos circuitos drives e no circuito de potência em malha aberta de acordo com os métodos descritos no capítulo anterior.

4.1 DRIVES

A seguir, figura 25, observa-se os quatro circuitos *drives*.

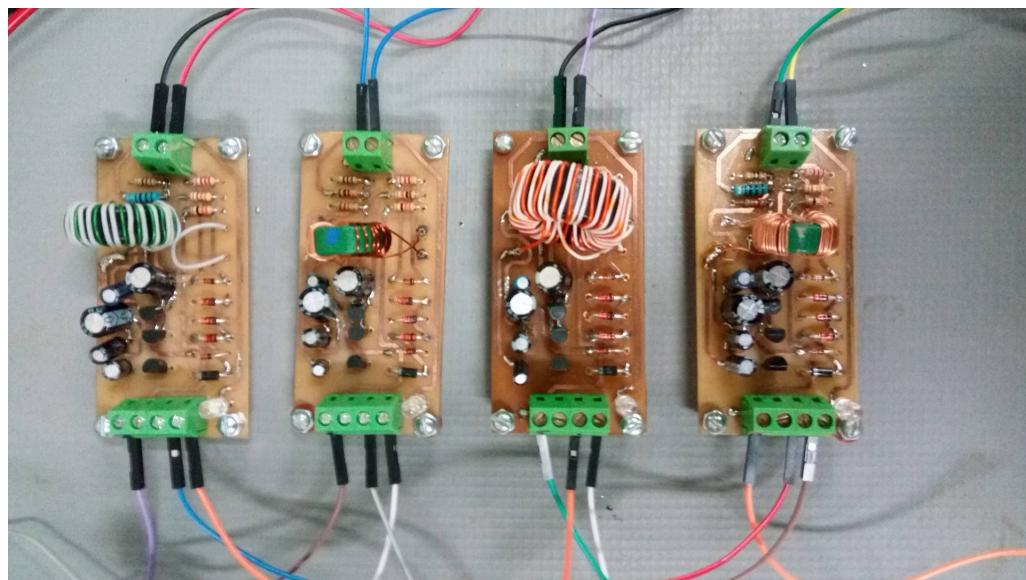


Figura 25 – Circuitos Drives
Fonte: Autoria própria.

Os circuitos estão alimentados com 12V em corrente contínua e suas entradas conectadas aos controlador SPWM. E este controlador fornece dois sinais defasados um ao outro, o PINV-1 e o PINV-2, conforme a figura 26.

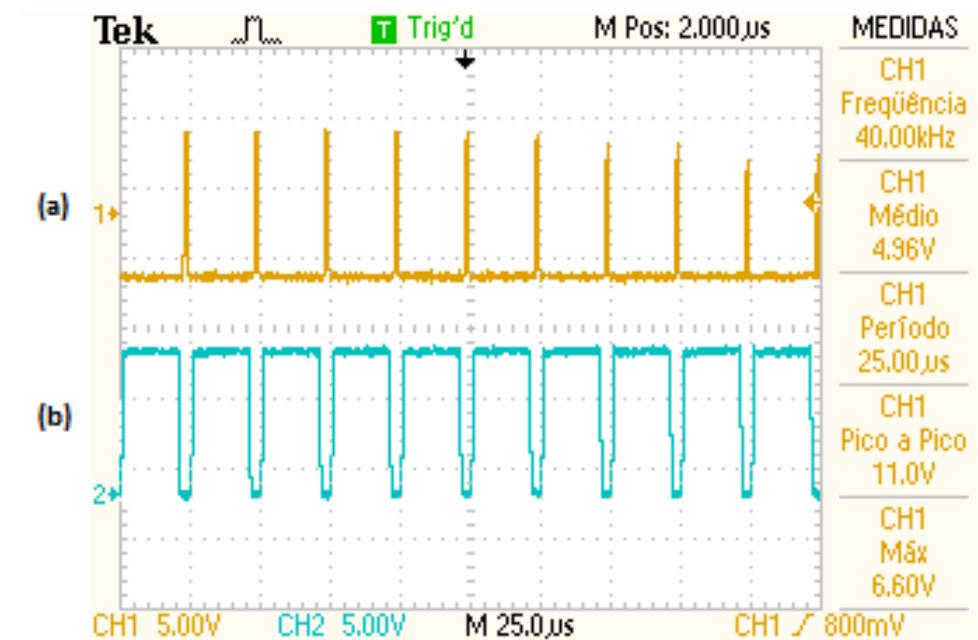


Figura 26 – (a) Sinal PINV-1 de entrada, (b) Sinal PINV-2 de entrada
Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 representa o sinal de saída de duas placas, na qual uma recebe o sinal PINV-1 em sua entrada, enquanto a outra o PINV-2, e as duas apresentam a frequência de 40kHz.

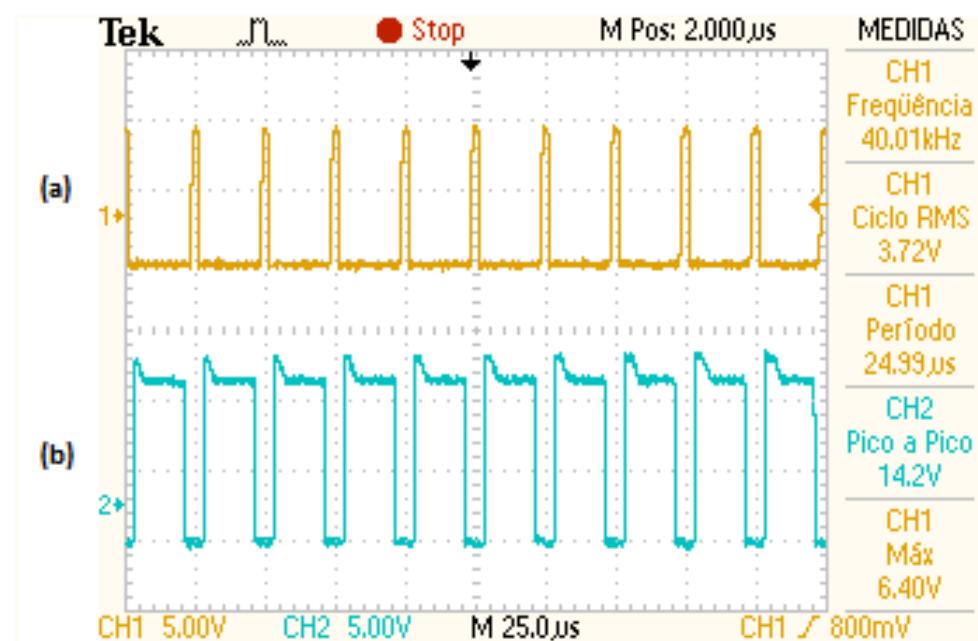


Figura 27 – (a) Sinal PINV-1 de saída, (b) Sinal PINV-2 de saída
Fonte: Autoria própria.

4.2 CIRCUITO DE POTÊNCIA

O circuito de potência, composto por oito dispositivos *mosfets*, está localizado sobre uma plataforma de alumínio para dissipação de calor, conforme figura 28.

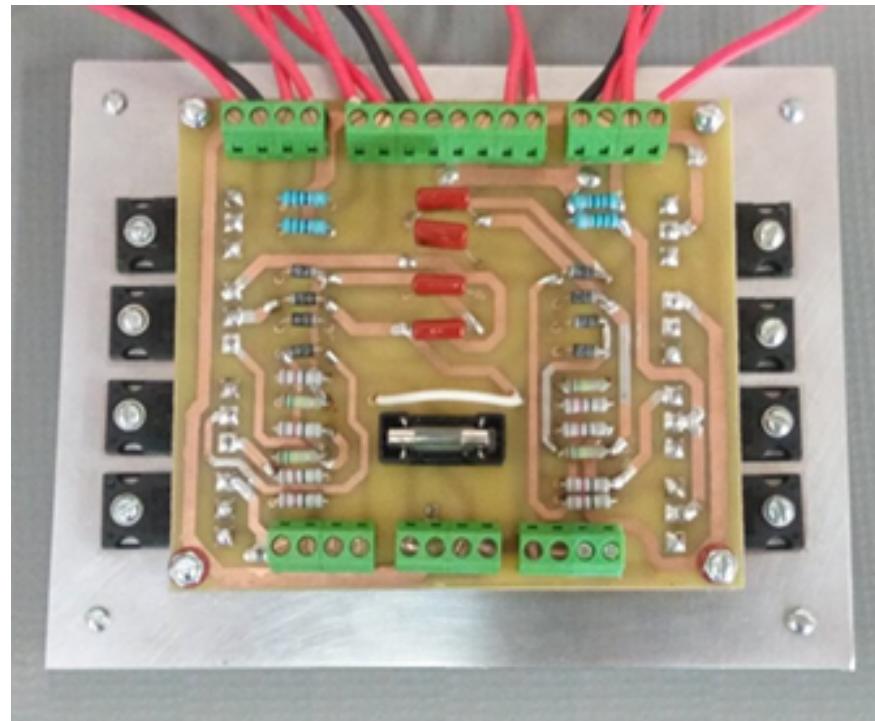


Figura 28 – Circuito de potência
Fonte: Autoria própria.

Com o circuito de potência alimentado, conectado à todos os *drives* e conectado ao filtro de saída, mede-se o consumo de corrente do circuito, para uma carga de $10\text{k}\Omega$, o nível de tensão de saída e o valor encontrado no barramento CC, conforme figura 29.

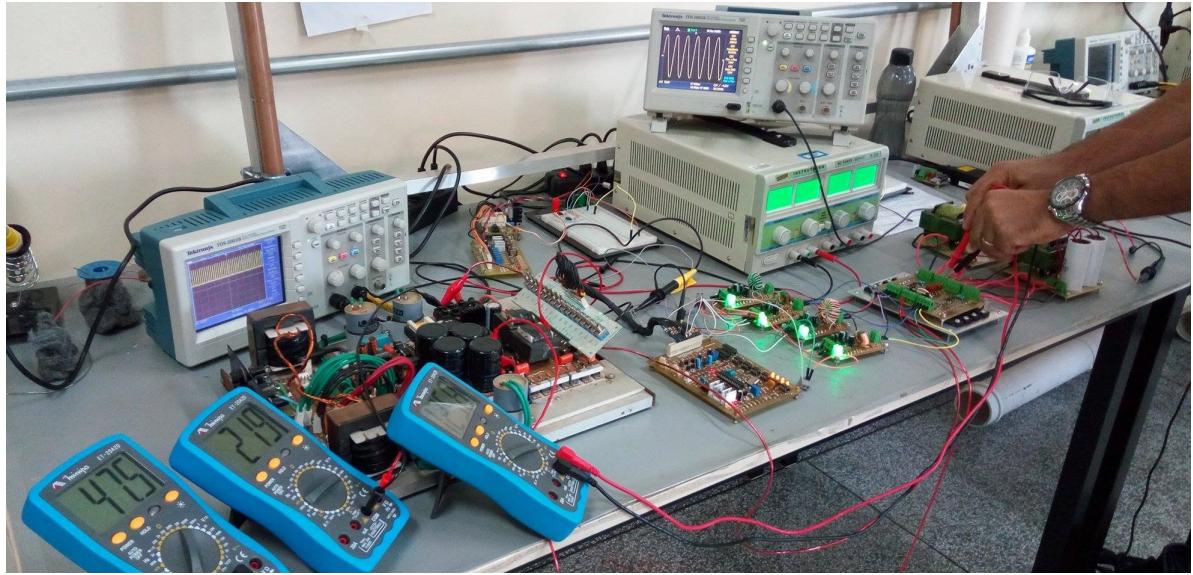


Figura 29 – Circuito de potência em funcionamento

Fonte: Autoria própria.

Conforme as medições, pode-se observar, de acordo com figura 30, um consumo de corrente no valor de 48mA para o circuito de potência, como também um valor de nível de tensão no barramento CC de 219V, para então obter em sua saída um nível de tensão CA de 125,8VRMS.



Figura 30 – Medidas do circuito de potência

Fonte: Autoria própria.

Na figura 31, apresenta-se as medidas da saída do circuito inversor com a carga de $10\text{k}\Omega$ e o nível de tensão na forma de onda senoidal, no canal 1 do osciloscópio.

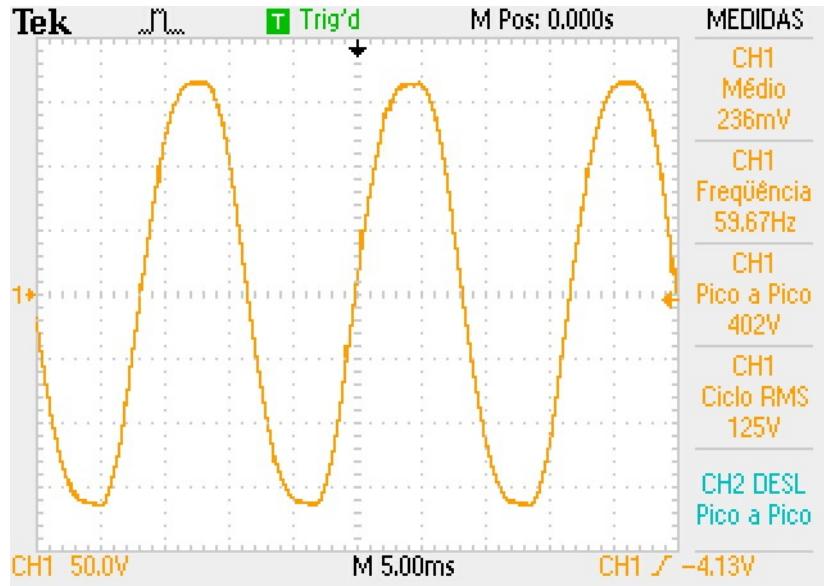


Figura 31 – Saída do circuito de potência com carga de 10kΩ.

Fonte: Autoria própria.

Nota-se a frequência com valor aproximado de 60hz, o nível de tensão pico a pico de 402V, valor RMS de 125V e corrente de saída de 12,5mA.

4.3 VARIANDO A TENSÃO DO BARRAMENTO CC

O barramento CC, visto no item 3.7, é alimentado pelo conversor *boost* do *no break* de Schiavon (2007). Desta forma, ao variar o valor fornecido ao barramento pode-se ver uma diferença na amplitude do nível de tensão na saída do circuito de potência. Então, para um barramento CC com nível de tensão de 204V, encontra-se o valor de 115VRMS, visto na figura 32.

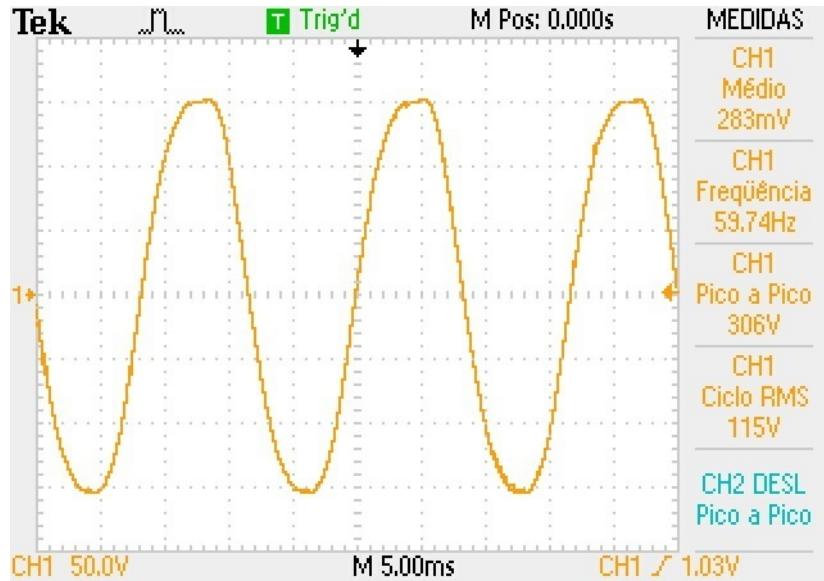


Figura 32 – Circuito de potência com 115VRMS

Fonte: Autoria própria.

E para um barramento CC com nível de tensão de 218V, encontra-se o valor de 125VRMS, visto na figura 33.

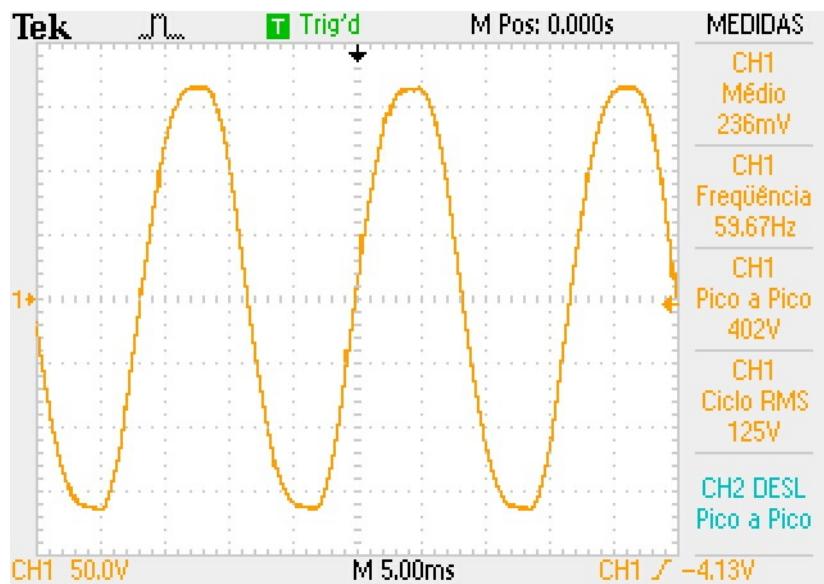


Figura 33 – Circuito de potência com 125VRMS

Fonte: Autoria própria.

4.4 CIRCUITO DE AMOSTRAGEM DE TENSÃO

Em sequência, tem-se o circuito de amostragem de tensão, figura 34.

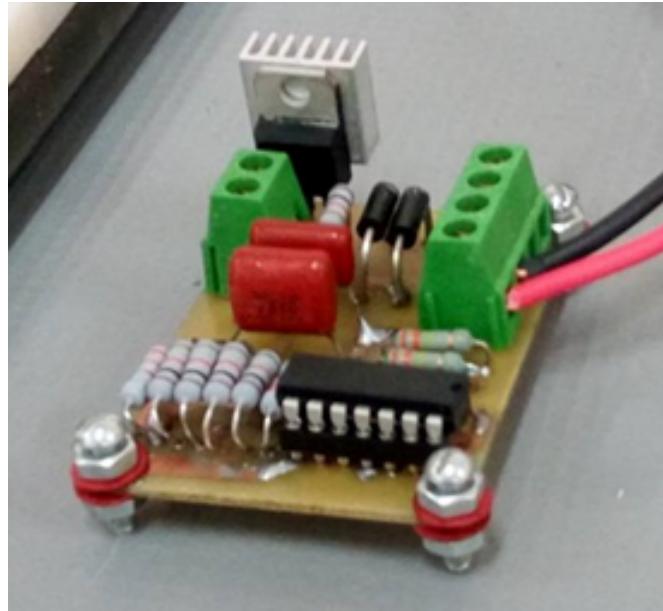


Figura 34 – Circuito de amostragem de tensão
Fonte: Autoria própria.

Esse circuito necessita de uma alimentação de 12V em CC, sua entrada é conectada em paralelo à carga do inversor e sua saída representa o nível de tensão de saída do circuito de potência.

Para um nível de tensão de 90V em CA na entrada do circuito de amostragem, tem-se a seguinte forma de onda em sua saída, conforme figura 35.



Figura 35 – Circuito de amostragem de tensão à 90V em CA
Fonte: Autoria própria.

Entretanto, para um nível de tensão de 127V em CA na entrada do circuito de amostragem, encontra-se uma forma de onda na saída, conforme figura 36.



Figura 36 – Circuito de amostragem de tensão à 127V em CA
Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, o circuito de controle de Schiavon (2007), atua na modulação SPWM de acordo com a largura de pulso do sinal provindo do circuito de amostragem.

4.5 PARTIDA DO INVERSOR

Interessante observar a partida suave do inversor de tensão, de acordo com figura 37, promovida pelo circuito de controle SPWM, de Schiavon (2007), na qual protege o circuito de oscilações súbitas no início do funcionamento até a estabilização.

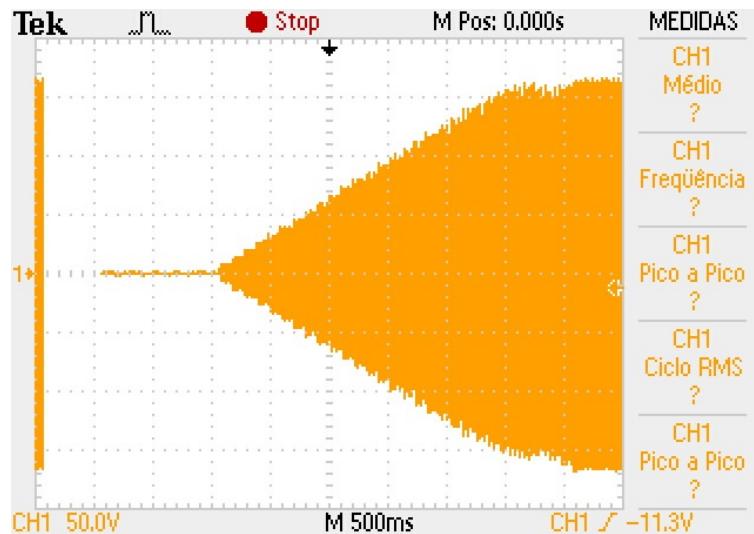


Figura 37 – Partida Suave
Fonte: Autoria própria.

4.6 CIRCUITO COMPLETO

Abaixo, figura 38, tem-se a comparação do circuito no qual o projeto foi baseado, de Schiavon (2007) à esquerda, com o circuito completo reproduzido de maneira modular, à direita, e assim, pode-se observar a dificuldade em analisar as etapas do dispositivo inversor do tipo fonte de tensão já desenvolvido, pois todo o conjunto fica agrupado no mesmo módulo. Em compensação, no circuito reproduzido nesse trabalho a facilidade para compreender as etapas do processo de conversão CC-CA ficam mais claras, uma vez que o conjunto está separado em vários módulos.

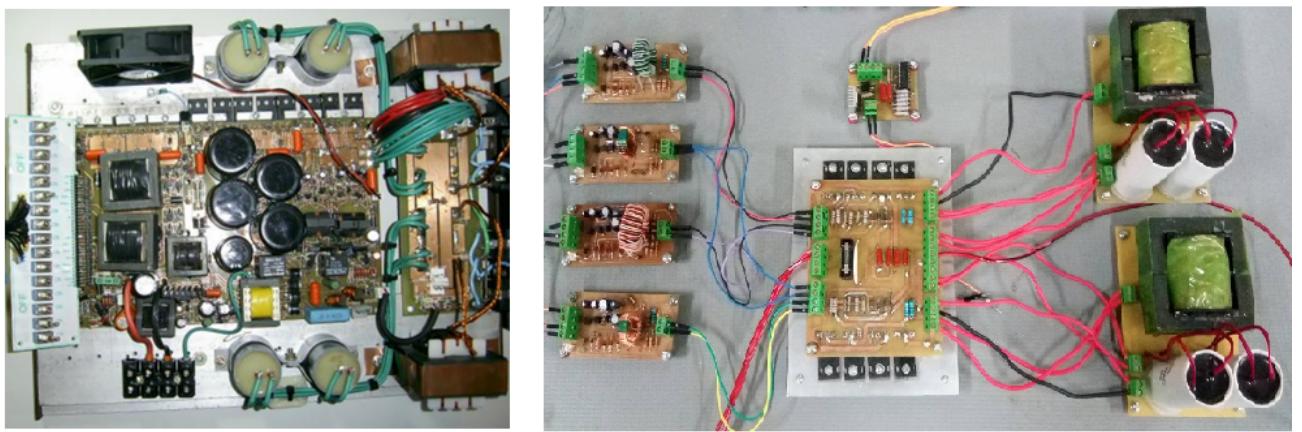


Figura 38 – Comparação dos circuitos
Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho sobre conversão de energia na forma de onda CC para CA, foi constatado a importância dos dispositivos de eletrônica de potência, tanto em áreas como qualidade de energia, quanto em aplicações novas do tipo painéis fotovoltaicos e sistemas eólicos, sendo relevante o estudo do conversor CC-CA de bom rendimento, confiabilidade e tensão de saída na forma de onda senoidal pura.

O trabalho apresentou o estudo, reprodução de maneira modular e análise do inversor de tensão aplicado em um *no break*, com função de dispor ao usuário uma tensão de mesma forma e magnitude em comparação com a tensão presente na rede elétrica, ou seja, 127VRMS e 60hz.

Portanto, os objetivos principais foram alcançados com sucesso, entre eles pode-se mencionar a representação do sistema de forma modular, como também a forma de onda senoidal na saída do inversor, com frequência e nível de tensão igual à rede elétrica, sendo ideal para dispositivos que exigem qualidade de energia.

A tensão de alimentação dos *drives* simula um banco de baterias e a tensão de alimentação do barramento CC tem origem no conversor *forward*, logo, o conjunto de circuitos confeccionados no trabalho pode ser adaptado a um *no break*, de topologia *on line* semelhante ao de Schiavon (2007), com facilidade. Contudo, o desenvolvimento do controle digital SPWM e um aumento no valor da potência do projeto pode ser considerado como sugestão para um trabalho futuro.

O conversor e os componentes adquiridos durante a execução do trabalho serão disponibilizados na UTFPR-CM, de forma que ao se juntar com outros conversores, disponíveis na Universidade, serão úteis aos alunos em aulas de eletrônica de potência, como também à alunos com projetos relacionados ao tema.

6 REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência.** São Paulo: Prentice Hall, 2000. 479 f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15014:** Sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada (nobreak). 2003. 11 p. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/erley/inst.-industriais-2/NoBreak-1.pdf>>.atdownload/file>. Acesso em: 03 maio 2016.

BATISTELA, Nelson Jhoe. **Inversor De Tensão Com Saída Senoidal Controlado Por Modo Deslizante Com Frequência Fixa.** 1994. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/76089>>. Acesso em: 23 maio 2016.

BATSCHAUER, Alessandro Luiz. **Modulação por Largura de Pulso.** Joinville, 2012. 34 slides, color. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/batschauer/materias/Aula_1_Modulacao_PWM.pdf>. Acesso em: 06 maio 2016.

BOLOGNINI, Ana Paula. **Inversor de Tensão utilizando transformador de alta freqüência com Modulação PWM.** 2006. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006. Disponível em: <http://www.uel.br/pos/meel/disserta/2006_Ana_Paula_Bolognini_2003-1.pdf>. Acesso em: 17 maio 2017.

BOLOGNINI, Ana Paula.; TREVISO, Carlos Henrique Gonçalves. **Voltage Inverter With High-Frequencies Single Phase Transformer With PWM Modulator;** Joinville : VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2004.

BUENO, Márcio Reginaldo; MIRANDA, Rodrigo Alves; BORGES, Rodrigo da Silva. **Análise e Implementação Da Etapa De Potência De Um UPS Utilizando Um Conversor CC-CC BOOST De 300W Com Estágio Multiplicador De Tensão.** 2007. 150 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CORRADI JUNIOR, Romeu. **Eletrônica de Potência.** Campinas, 2011. Color. Disponível em: <<http://www.corradi.junior.nom.br/eli-2011-apo.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

FAIRCHILD. **IRFP460**. 2017. Disponível em: <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/IRFP460.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2017.

FERNANDES, Carlos Arthur de Oliveira; GUARONGHI, Vinícius Mendes. **Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/ em313/paginas/esolar/esolar.html>>. Acesso em: 02 maio 2016.

GARCIA, Pedro Francisco Donoso; CORTIZO, Porfírio Cabaleiro. **Sistemas de Energia Ininterrupta** Belo Horizonte, 2001. 63 slides, color. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/ elt/docs/sei.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2016.

GERENT, Fernando Haeming. **Metodologia De Projeto De Inversores Monofásicos De Tensão Para Cargas Não-Lineares**. 2005. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102528/223393.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 23 maio 2016.

HART, Daniel W.. **Eletrônica de Potência**: análise e projetos de circuitos. Porto Alegre: AMGH Editora, 2001. 451 p.

HART, Daniel W.; **Eletrônica de Potência**: análise e projetos de circuitos. Porto Alegre. AMGH editora, 2012.

LIMA, Francisco K. A.; CRUZ, Cícero M. T.; ANTUNES, Fernando L. M.. **Estudo de Snubbers Passivos Aplicados a um Retificador Monofásico com Alto Fator de Potência**. In: IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 2., 2004, Fortaleza. Revista. Fortaleza: Ieee, 2004. p. 87 - 93. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1468625>>. Acesso em: 04 maio 2017.

MECA. **PWM - Modulação Por Largura de Pulso**. 2008. Disponível em: <http://www.mecaweb.com.br/elettronica/content/e_pwm>. Acesso em: 08 maio 2017.

MEDEIROS FILHO, Carlos Fernandes de. **Biografia William Bradford Shockley**. Universidade Federal de Campina Grande. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/Willibra.html>>. Acesso em: 10 maio 2016.

MICHELS, Leandro; CAMARGO, Robinson F. de; BOTTERÓN, Fernando. **Metodologia De Projeto De Filtros De Segunda Ordem Para Inversores De Tensão Com Modulação PWM Digital.** Revista Controle Automação, Santa Maria, v. 16, n. 2, p.221-242, jun. 2005.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle Moderno.** Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1982. 929 p.

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia.** 2017. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf>. Acesso em: 14 maio 2017.

PEREIRA, José Claudio. **Sistemas Elétricos de Suprimentos de Energia para Cargas de Missão Crítica.** 2003. Disponível em: <<http://www.perfectum.eng.br/PDF/Cargas2.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

PINHEIRO FILHO, Ricardo Ferreira. **Estudo e Implementação De Uma Fonte De Tensão Alternada De 220V/1kW Alimentada Por Fontes CC De 24V.** 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

POMILIO, José Antenor. **Eletrônica De Potência - Introdução Ao Curso.** Campinas, 1998. 14 slides, color. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/_antenor/pdffiles/hist.pdf>. Acesso em: 02 maio 2016.

POMILIO, José Antenor. **Conversores CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM FREQUÊNCIA CONSTANTE.** 2009. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/_antenor/pdffiles/ee833/Modulo6.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2016.

POMILIO, José Antenor. **CONVERSORES CC/CA - INVERSORES.** 2014. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/_antenor/pdffiles/it744/CAP4.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2016.

RECH, Cassiano. **Eletrônica de Potência II Capítulo 4: Modulação PWM.** Joinville, 2016. 13 slides, color.

SCHIAVON, Gilson Junior. **No-Break 1,2kVA, Senoidal, Operando Em Malha Fechada: Circuito De Potência, Circuito De Controle Analógico e Circuito De Controle Digital Com DSC.** 2007. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007. Disponível em: <<http://la2i.com/meel/gilson07nobreak.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2016.

SIMAS, Eduardo. **Comutação e Perdas Térmicas.** Salvador: Ufba, 2009. 22 slides, color. Disponível em: <<http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/09-ElePot-Comutacao-e-PerdasTermicas.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2017.

VIVALDINI, Kelen Cristiane Teixeira. **PWM:** São Carlos: Escola de Engenharia de SÃO Carlos, 2009. 10 slides, color. Disponível em: <http://www.mecatronica.eesc.usp.br/wiki/upload/2/21/Aula_3_PWM.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

Anexos

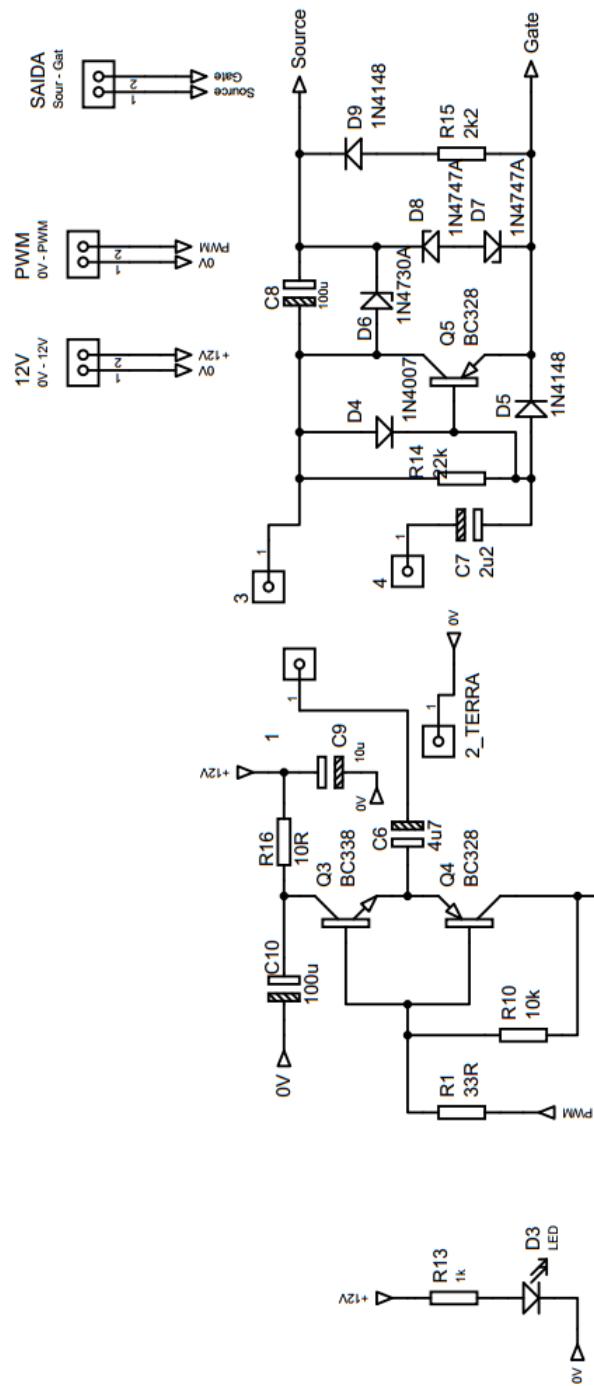
ANEXO A – NÚCLEOS DE FERRITE

Tabela A.1 – Tipos de núcleo

Núcleo	K_J $20^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 60^{\circ}\text{C}$	X
POTE	$74,78 \cdot \Delta T^{0,54}$	+ 0,17
EE	$63,35 \cdot \Delta T^{0,54}$	+ 0,12
X	$56,72 \cdot \Delta T^{0,54}$	+ 0,14
RM	$71,70 \cdot \Delta T^{0,54}$	+ 0,13
EC	$71,70 \cdot \Delta T^{0,54}$	+ 0,13
PQ	$71,70 \cdot \Delta T^{0,54}$	+ 0,13

Fonte: BOLOGNINI (2006).

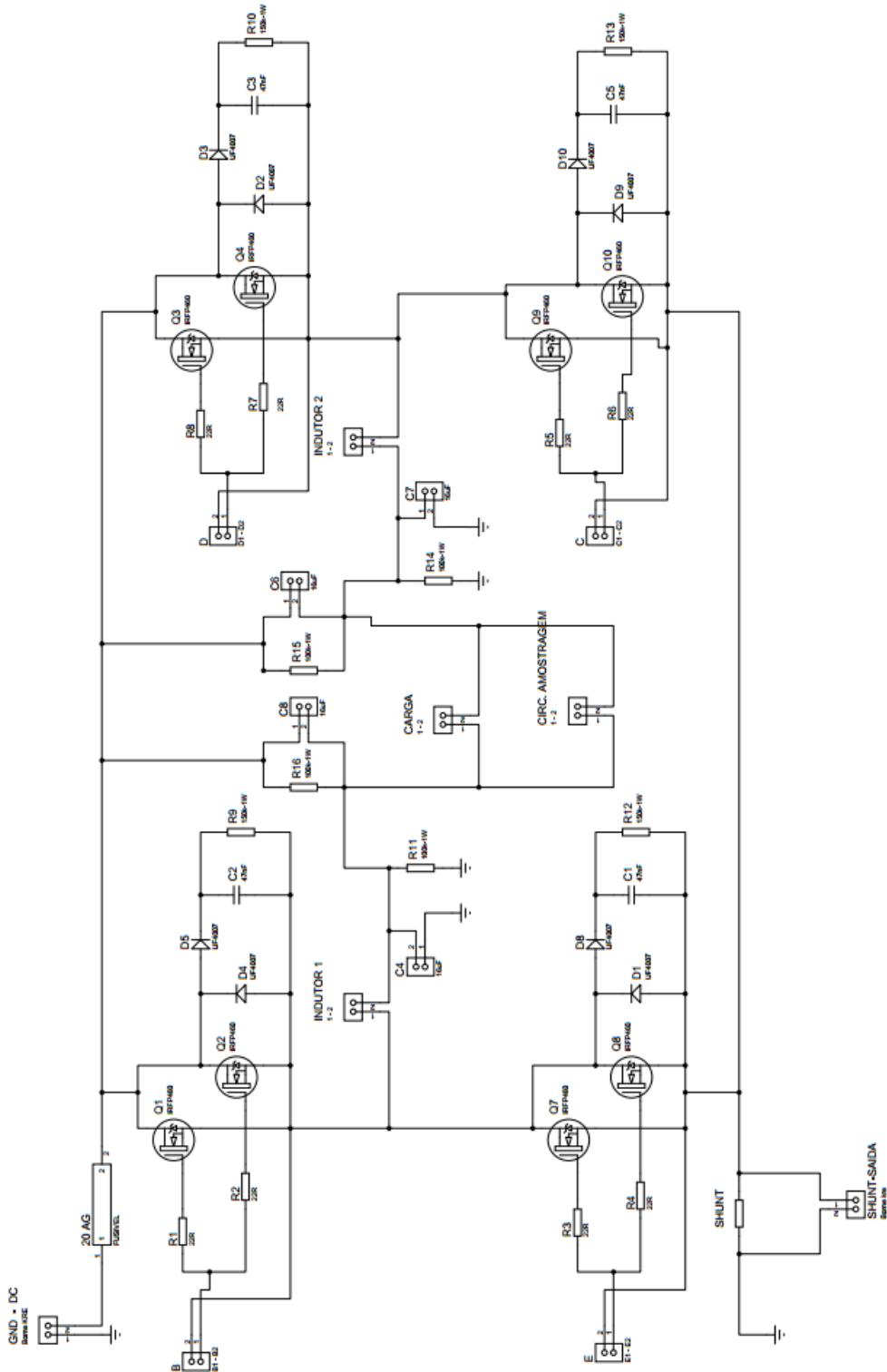
ANEXO B – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO DRIVE



ANEXO C – LISTA DE MATERIAIS DO CIRCUITO DRIVE

Quantidade	Componente	Descrição
1	R1	33R
1	R10	10k
1	R13	1k
1	R14	22k
1	R15	2k2
1	R16	10R
1	C6	4u7
1	C7	2u2
2	C8 e C10	100u
1	C9	10u
1	D3	Diodo Led
1	D4	UF4007
2	D5 e D9	1n4148
1	D6	1n4730
2	D7 e D8	1n4747
1	Q3	BC338
2	Q4 e Q5	BC328
3	12V, PWM E SAÍDA	KRE-2 Vias
1	TRAFO	Transf. De Pulso 1:1

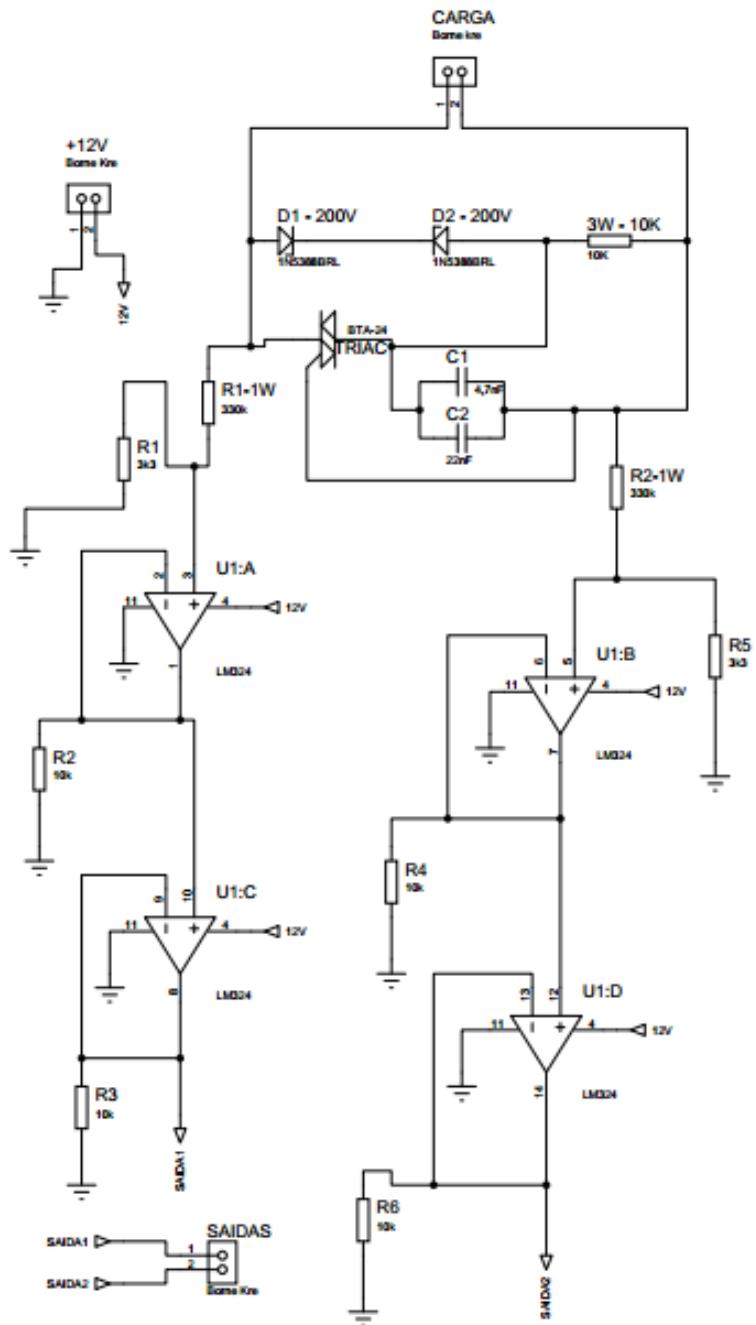
ANEXO D – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO DE POTÊNCIA



ANEXO E – LISTA DE MATERIAIS DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

Quantidade	Componente	Descrição
8	R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8	22R
4	R9,R10,R12,R13	150k/1W
4	R11,R14,R15,R16	100k
8	D1,D2,D3,D4,D5,D8,D9,D10	UF4007
1	FUSÍVEL	20 AG
8	Q1,Q2,Q3,Q4,Q7,Q8,Q9,Q10	IRFP460
2	INDUTOR 1, INDUTOR 2	500u
4	C4,C6,C7,C8	16u
7	B,C,D,E,DC,CARGA,AMOST.	KRE-2 Vias

ANEXO F – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO DE AMOSTRAGEM DE TENSÃO



ANEXO G – LISTA DE MATERIAIS DO CIRCUITO DE AMOSTRAGEM DE TENSÃO

Quantidade	Componente	Descrição
1	U1:A, U1:B, U1:C, U1:D	LM324
3	12V,Carga, Saídas	KRE-2 Vias
2	R1,R5	3k3/1W
2	R1-1W, R2-1W	330K/1W
1	R3W	10K/3W
4	R2,R3,R4,R6	10k
1	Triac	BTA-24
2	D1,D2	1N5388
1	C1	4,7n
1	C2	22n