

FERNANDO SCHEIBE

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MÓDULO INVERSOR DE FONTE DE
TENSÃO TRIFÁSICO**

TOLEDO-PR
2019

FERNANDO SCHEIBE

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MÓDULO INVERSOR DE FONTE DE
TENSÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Alberto Vinicius de Oliveira

TOLEDO-PR
2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 110

Implementação de um módulo inversor de fonte de tensão trifásico

por

Fernando Scheibe

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às **09h30 do dia 11 de dezembro de 2019** como **requisito parcial** para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Ednei Luiz Miotto
UTFPR

Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer
UTFPR

Alberto Vinicius de Oliveira
UTFPR

Prof. Dr. Fábio Risental Coutinho
UTFPR

O termo de aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso

Toledo-PR, 11 de dezembro de 2019

À minha família, que sem ela eu não seria nada.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alberto Vinicius de Oliveira, que me aconselhou e orientou dando a direção no desenvolvimento deste trabalho, sempre com boas ideias estimulando a busca de novos conhecimentos.

Agradeço a minha família, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e fizeram com que meus objetivos fossem alcançados.

Aos meus amigos de classe que sempre me ajudaram nas dificuldades encontradas no decorrer do curso, em especial ao grupo de amigos ARAM. Aos meus amigos de Cascavel-PR, em especial ao Caio Andrade de Abreu, afinal são 15 anos de amizade.

E a todos os professores da UTFPR, campus Toledo-PR, que fizeram parte do meu processo de formação acadêmica, porque sem bons professores não se formam bons profissionais.

Eu denomino meu campo de Gestão do Conhecimento, mas você não pode gerenciar conhecimento. Ninguém pode. O que pode fazer - o que a empresa pode fazer - é gerenciar o ambiente que otimize o conhecimento. (PRUSAK, Laurence, 1997).

RESUMO

A sustentabilidade é um tema relevante em todas as áreas das ciências. Como consequência, fontes renováveis tem sido empregadas na geração de energia elétrica. Desta forma, necessita-se de alguns dispositivos para conversão da energia elétrica gerada e gerenciamento do fluxo de potência, tal como circuito inversor. Este trabalho retrata conceitos de inversores trifásicos de fonte de tensão (VSI) e circuitos de acionamento dos inversores para a obtenção de uma saída trifásica do inversor. Ainda foi projetado e implementado um retificador de onda completa com filtro capacitivo para obter uma tensão com baixa ondulação no barramento CC. Utilizando a técnica de chaveamento modulação por largura de pulso (SPWM), programada por meio de um microcontrolador, o módulo inversor foi capaz de gerar uma tensão de $127 V_{RMS}$, com uma frequência fundamental de 60 Hz e uma potência de 100 W, apresentando um taxa de distorção harmônica de aproximadamente 8,62 % e fator de distorção de 1,62 %, sem a utilização de um filtro indutivo-capacitivo.

Palavras-chave: VSI Trifásico. Chaves estáticas MOSFET. Malha aberta. Técnica de chaveamento SPWM.

ABSTRACT

Sustainability is a relevant topic on all fields of science. As a consequence, renewable energy resources have become more and more often in the electrical energy generation process. In this context, there is a need for electrical energy conversion and power flow flux managing devices, such as the inverter. This paper study covers a covered three-phase inverters (VSI) concepts and inverter actuation circuits with the intent of achieving a three-phase output at the inverter. In addition, a full-wave rectifier with a capacitive filter was designed and implemented, so that it was possible to achieve a output voltage with no ripple effect at the DC bus. Based on the switching technique using Senoidal Pulse-Width Modulation (SPWM) - designed and implemented through a microcontroller -, the inverter was able to produce a voltage of $127 V_{RMS}$, with a fundamental frequency of 60 Hz and a power output of 100 W, with a harmonic distortion rate of approximately 8,62 % and distortion factor 1,62 %, without the use of a inductive-capacitive filter.

Keywords: Three-phase VSI. MOSFET switches. Open loop. SPWM switching technique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Mundial 2016.	15
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira 2017.	16
Figura 3 – Forma de onda típica do método de modulação SPWM.	19
Figura 4 – Forma de onda modulada por SPWM.	19
Figura 5 – Circuito da ponte retificadora de onda completa com filtro capacitivo e sua forma de onda da saída.	20
Figura 6 – Circuito básico de um inversor em meia ponte e a forma de onda da tensão de saída na carga.	22
Figura 7 – Circuito básico de um inversor em meia ponte no estado 1 e estado 3 de condução.	22
Figura 8 – Circuito básico de um inversor em ponte completa e a forma de onda da tensão de saída na carga.	23
Figura 9 – Circuito básico de um inversor em ponte completa e a forma de onda da tensão de saída na carga para o estado 1 e estado 3 de condução.	23
Figura 10 – Inversor <i>push-pull</i>	24
Figura 11 – Estrutura básica de um inversor trifásico em ponte completa.	24
Figura 12 – Inversor trifásico de tensão em ponte alimentando uma carga trifásica balanceada puramente resistiva conectada em Y	26
Figura 13 – Formas de onda das tensões de fase e de linha do Inversor trifásico tipo 120° com uma carga em Y	27
Figura 14 – Formas de onda das correntes de fase do inversor trifásico tipo 120° com uma carga em Y	28
Figura 15 – Formas de onda das tensões de fase e de linha do Inversor trifásico tipo 180° com uma carga em Y	29
Figura 16 – Formas de onda das correntes de fase do Inversor trifásico tipo 180° com uma carga em Y	30
Figura 17 – Formas de onda das tensões de fase e de linha do Inversor trifásico tipo 180° com uma carga em Y e modulação SPWM.	31
Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema completo com todos os módulos necessários para a validação.	33
Figura 19 – Esquemático utilizado em <i>software</i> para geração do sinal de SPWM.	37
Figura 20 – Esquemático utilizado em <i>software</i> para simulação do VSI trifásico com carga de $100\ \Omega$ conectado em Y	37
Figura 21 – Placa com circuito do módulo de potência: (A) Entrada da tensão CA; (B) Ponte retificadora; (C) Filtro capacitivo; (D) Saída da tensão CC.	38

Figura 22 – Placa com circuito do módulo VSI trifásico: (A) Microcontrolador gerando SPWM; (B) Módulo de Controle; (C) MOSFETs; (D) Sensores de tensão; (E) Alimentação CC; (F) Saída das fases R,S e T.	38
Figura 23 – Sinal de tensão da saída da ponte retificadora.	40
Figura 24 – Sinal do SPWM gerado pelo Arduino com frequência de 60 Hz.	41
Figura 25 – Formas de onda dos sinais de SPWM complementares obtidos a partir da simulação e do Arduino: (a) SPWM para $gates G_1$ e G_2 simulados (b) SPWM para $gates G_1$ e G_2 do circuito prático.	41
Figura 26 – Formas de onda dos sinais de SPWM defasados obtidos a partir da simulação e do circuito de acionamento: (a) SPWM para $gates G_1$ e G_2 do circuito prático (b) SPWM para $gates G_1$ e G_3 do circuito prático (c) SPWM para $gates G_1, G_2$ e G_3 simulados.	42
Figura 27 – Formas de onda da tensão de fase V_{RN} do módulo VSI trifásico para uma carga em Y de 100Ω , com uma alimentação de 15 V, obtidos a partir da simulação e do circuito teste: (a) Tensão de fase obtida em simulação (b) Tensão da fase obtida através da função <i>MATH</i> do osciloscópio.	43
Figura 28 – Formas de onda da tensão de linha V_{RS} do módulo VSI trifásico para uma carga em Y de 100Ω , com uma alimentação de 15 V, obtidos a partir da simulação e do circuito teste: (a) Tensão de linha obtida em simulação (b) Tensão da linha obtido através da função <i>MATH</i> do osciloscópio.	43
Figura 29 – FFT da fase V_R obtida com uma tensão de alimentação de 15 V: (a) FFT com 2,00 V/div e 3,125 kHz/div (b) FFT com 1,00 V/div e 1,250 kHz/div.	44
Figura 30 – Formas de onda das tensões de fase e linha do módulo VSI trifásico para uma carga em Y de 161Ω obtidos a partir do circuito teste: (a) Tensão da fase RN obtido através da função <i>MATH</i> do osciloscópio (b) Tensão da linha RS obtido através da função <i>MATH</i> do osciloscópio.	44
Figura 31 – FFT da fase V_R obtida com uma tensão de alimentação de 180 V: FFT com 10,00 V/div e 62,50 Hz/div	45
Figura 32 – Diagrama esquemático do sistema completo do módulo VSI trifásico.	49
Figura 33 – <i>Layout</i> da PCI do módulo VSI trifásico desenvolvido em <i>software</i> computacional.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estados do chaveamento do inversor em meia-ponte.	22
Tabela 2 – Estados do chaveamento do inversor em ponte completa.	23
Tabela 3 – Sequência de chaveamento do inversor trifásico tipo 120°	25
Tabela 4 – Tensões de fase em cada intervalo de chaveamento para uma carga puramente resistiva conectada em Y	26
Tabela 5 – Sequência de chaveamento do inversor trifásico tipo 180°	29
Tabela 6 – Requisitos do sistema.	33
Tabela 7 – Componentes utilizados para confecção do módulo VSI trifásico.	34
Tabela 8 – Componentes para confecção do módulo de potência utilizado para validação.	35
Tabela 9 – Componentes utilizados para o módulo VSI trifásico.	36
Tabela 10 – Relação entre graus, período e frequência para medição da defasagem dos sinais.	39
Tabela 11 – Medidas das amplitudes das harmônicas e da componente fundamental obtidos no teste para tensão de alimentação de 180 V e carga de 161Ω	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
CSI	Inversor de Fonte de Corrente (<i>Current Source Inverter</i>)
FD	Fator de Distorção
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
GD	Geração Distribuída
GTO	Tiristor de Porta Desativada (<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>)
HBO	Harmônico de Mais Baixa Ordem
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
MPPT	Rastreador do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCI	Placa de Circuito Impresso
PWM	Modulação da Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
SPWM	Modulação da Largura de Pulso Senoidal (<i>Sine Pulse Width Modulation</i>)
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
THD	Distorção Harmônica Total
UPS	Sistemas de Alimentação Ininterrupta (<i>Uninterruptible Power Supply</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência
f_p	Frequência da Portadora
T	Período do sinal
N	Número de pulsos
M	Índice de Modulação
A_r	Amplitude do Sinal Fundamental
A_p	Amplitude do Sinal Portadora
$v_{o_{max}}$	Tensão Máxima de Saída
E	Fonte de Alimentação
$v_{o_{ef}}$	Tensão Eficaz de Saída
V_R	Tensão de <i>Ripple</i>
V_p	Tensão de Pico
$V_{D,on}$	Tensão do Diodo Ligado
S	Chave Estática
i	Corrente
v_o	Tensão de Saída
R	Carga Resistiva
v_{RN}, v_{SN}, v_{TN}	Tensões de Fase
v_{RS}, v_{ST}, v_{TR}	Tensões de Linha
V_{Fef}	Tensão Eficaz de Fase
V_{Lef}	Tensão Eficaz de Linha
i_R, i_S, i_T	Correntes de Fase
I_{Lef}	Corrente Eficaz de Linha
P_F	Potência Média Dissipada por Fase
$P_{3\phi}$	Potência Média Total Trifásica
P_E	Potência de Entrada
I_{Emd}	Corrente Média de Entrada
I_{Smd}	Corrente Média nas Chaves
$V_{o_{1ef}}$	Tensão Eficaz da Componente Fundamental
$V_{o_{nef}}$	Tensão Eficaz da N-Ésima Componente Harmônica

SUMÁRIO

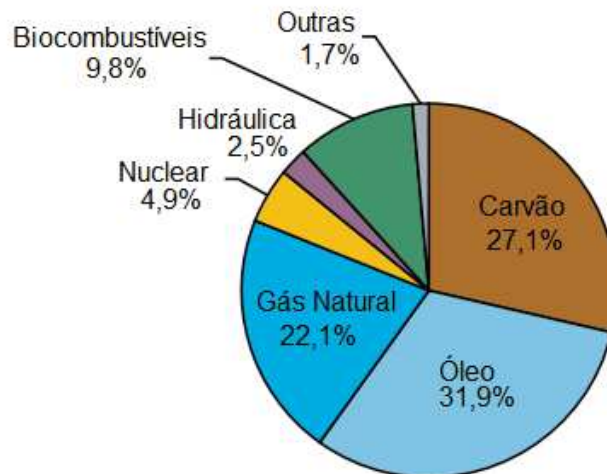
1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Modulação por Largura de Pulso (PWM)	18
2.1.1	PWM Simples	18
2.1.2	PWM Múltiplo	18
2.1.3	PWM Senoidal	19
2.2	Retificador de Onda Completa em Ponte e Barramento CC	20
2.3	Conversores CC-CA Monofásicos	21
2.4	Conversores CC-CA Trifásico	24
2.4.1	Inversor de fonte de tensão trifásico tipo 120°	25
2.4.1.1	Carga resistiva conectada em estrela (Y)	25
2.4.2	Inversor de fonte de tensão trifásico tipo 180°	28
2.4.2.1	Carga resistiva conectada em estrela (Y)	29
2.4.2.2	Carga resistiva conectada em estrela (Y) com SPWM	31
2.5	Parâmetros de Desempenho	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Metodologia e materiais para implementação do módulo VSI trifásico	33
3.1.1	Módulo de Potência	34
3.1.2	Módulo inversor VSI trifásico	34
3.1.2.1	Módulo de Controle	35
3.1.2.2	Sensor de tensão	36
3.1.3	Barramentos de Entrada e de Saída	36
3.2	Metodologia e materiais para validação do módulo VSI trifásico	36
3.2.1	Simulações computacionais	36
3.2.2	Implementação prática	37
3.2.3	Medindo a defasagem	39
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	40
4.1	Resultado do módulo de potência	40
4.2	Resultados da implementação do SPWM	40
4.3	Resultados da implementação do VSI trifásico	42
5	CONCLUSÃO	46
5.1	Trabalhos Futuros	46

Referências	47
Apêndices	48
APÊNDICE A Esquemático elétrico do sistema completo	49
APÊNDICE B <i>Layout</i> da PCI do Módulo VSI Trifásico	50

1 INTRODUÇÃO

Um tema muito debatido recentemente a respeito de sustentabilidade é a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Um conceito relacionado a isto é a matriz energética, a qual relaciona o conjunto de fontes de energia disponíveis que, por sua vez, suprem a demanda de energia regional. A matriz energética do mundo – Figura 1 – é composta em boa parte por fontes não renováveis, como carvão e petróleo (59%). Enquanto que as fontes renováveis, como a solar e eólica, representam 14% (INTERNACIONAL ENERGY AGENCY, 2018). Neste contexto, a matriz energética brasileira apresenta um uso de cerca de 42,9% das fontes renováveis para produção de energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

Figura 1 – Matriz Energética Mundial 2016.



Fonte: Adaptado de INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (2018) .

Ao considerar apenas fontes geradoras de energia elétrica, tem-se a matriz de energia elétrica, a qual compõe a matriz energética. No Brasil, 65,2% da produção de energia elétrica é de predominância da fonte hidráulica, como apresentado na Figura 2, mostrando quão consolidada é essa fonte de geração no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

Outra fonte de energia elétrica que merece destaque nacional é a solar, pois esta apresentou um crescimento na geração de energia elétrica de 875,6% de 2016 para 2017. Em 2017, cerca de 46,2% de energia produzida desta fonte corresponde à geração distribuída, tendo uma capacidade instalada de 174,5 MW (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). A Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração realizada próximo à unidade consumidora, assim economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas nestes sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica (INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2014).

O crescimento na utilização de GD se deu a partir de 2004, quando este termo foi

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira 2017.



Fonte: Adaptado de EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2018) .

mencionado na lei federal 10.848/04 que trata sobre a comercialização de energia elétrica. Entretanto, a difusão de GD ocorreu após a publicação do decreto lei nº 5.163/2004, que regula a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessão e de autorizações de geração de energia elétrica e que traz, em seu artigo 14, a definição de GD (INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2014).

A GD é composta por co-geradores, geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo, painéis fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e turbinas eólicas. A energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos, por exemplo, é em regime de Corrente Contínua (CC). Porém, todos os equipamentos industriais, domiciliares ou a própria rede elétrica de distribuição utiliza o padrão de Corrente Alternada (CA). Para resolver este problema, utiliza-se um conversor CC-CA, comumente chamado de inversor. Ele é um dispositivo que converte o sinal elétrico CC em CA. O inversor pode ser classificado em dois modos de operação: *on grid* e *off grid*.

O inversor *on grid* é utilizado para ligar na rede sistemas de GD que não possuem um banco de baterias. Tem como propósito a interação entre a energia elétrica da rede e a gerada pela GD. O inversor deve ser capaz de detectar falhas ou anomalias da rede, como flutuações de tensão ou de frequência e possui a vantagem de ser projetado para desligar-se rapidamente da rede elétrica, caso haja queda de energia, evitando danos a GD ou a carga (SOUZA, 2017). Há inversores utilizados no modo *on grid* que possuem especificações variadas dos parâmetros de entrada e de saída, dependendo da aplicação, por exemplo, monitoramento remoto, rastreador do ponto de máxima potência (MPPT) e sistemas de proteção anti-ilhamento.

O inversor *off grid* é um sistema isolado que utiliza a energia armazenada em bancos de baterias para gerar o sinal elétrico em CA, assim alimenta diretamente as cargas. Neste modo de operação, o inversor independe da rede elétrica, ou seja, não influencia no sinal elétrico CA da rede de energia. Como principal vantagem, destaca-se que o inversor pode ser instalado em áreas remotas ou rurais, onde não há fornecimento de energia elétrica pela concessionária (SOUZA,

2017). Os inversores *off grid* comercializados atualmente possuem dispositivos de desligamento automático para sobre aquecimento, curto-circuito ou sobrecarga na saída do inversor.

Para o modo *on grid*, os inversores comercializados apresentam um custo na faixa de R\$ 5.390,00 a R\$ 25.000,00 para valores de 1300 W a 20000 W de potência (NEOSOLAR, 2018b), apresentando um custo de 4,15 R\$/W para a potência menor e 1,25 R\$/W para a maior. Já no modo *off grid*, os valores estão na faixa de R\$ 509,00 a R\$ 14.175,00 para valores de 280 W a 4500 W de potência (NEOSOLAR, 2018a), tornando o custo da potência 1,82 R\$/W para a menor potência e 3,15 R\$/W para a maior.

O inversor também pode ser empregado para converter uma rede monofásica em trifásica, possibilitando a utilização de um motor trifásico como carga do sistema, sendo utilizado em indústrias de pequeno e médio porte onde elas são atendidas pela rede monofásica. Outras aplicações para os inversores são como estabilizadores de tensão, sistemas de alimentação ininterrupta (UPS) utilizados em locais como hospitais e *data centers*, aplicações espaciais, aeronáuticas, veiculares, para o controle de velocidade de motores, entre outras aplicações.

Com o crescimento da oferta de GD e as demandas industrial e residencial por equipamentos trifásicos se justifica a confecção de um módulo inversor voltado para qualquer aplicação supracitado, atendendo as necessidades do mercado e barateando custos para a produção nacional.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal implementar um módulo inversor trifásico de malha aberta, tensão elétrica eficaz de 127 V, frequência de saída 60 Hz e potência de 100 W, para aplicações em modo *off grid*. Para isso, os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- a) implementar um layout de Placa de Circuito Impresso (PCI) disponibilizando saídas para os níveis de tensões de cada fase, para viabilizar o controle em malha fechada, por qualquer dispositivo de processamento de dados;
- b) aplicar técnica de chaveamento para obter um fator de distorção de até 5 %;
- c) desenvolver o módulo com o menor custo possível.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentados os conceitos sobre modulação por largura de pulso (PWM), retificador monofásico e barramento CC, conversores CC-CA monofásicos e trifásicos e parâmetros de desempenho de um inversor.

2.1 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

Modulação por largura de pulso é um conceito que refere-se a pulsar um sinal. Esta técnica pode ser empregada para o controle de motores elétricos, aquecedores, LEDs ou luzes com intensidades ou frequências diferentes (BARBI, 2008). No controle de motores elétricos, por exemplo, o PWM tem a função de chavear as chaves estáticas para acionar o motor. Possui três métodos: pulso simples, pulso múltiplo e pulso senoidal. Estes consistem em uma comparação entre ondas, uma fundamental e uma portadora (AHMED, 2000).

A frequência da fundamental determina a frequência do sinal de saída (f), e a frequência da portadora (f_p) determina o número de pulsos de tensão. A relação entre o período (T) e a frequência é dada por

$$T = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

(BARBI, 2008).

2.1.1 PWM Simples

Este método consiste em um único pulso por semiciclo da tensão de saída gerando uma onda quadrada. O controle da tensão de saída é feita através da largura do pulso, desta forma podendo ser ajustada linearmente de zero até o valor máximo. Neste método, utiliza-se uma onda retangular como a fundamental e uma onda triangular como a portadora (AHMED, 2000). Este método não é muito utilizado por apresentar muito conteúdo harmônico.

2.1.2 PWM Múltiplo

Diferente do item 2.1.1, este controla a tensão na saída através da quantidade de pulsos gerados a cada semiciclo, fornecendo um trem de pulsos de amplitude constante. Utilizando uma onda retangular como fundamental e uma onda triangular como portadora. O número de pulsos (N) depende da razão entre f e f_p da seguinte forma

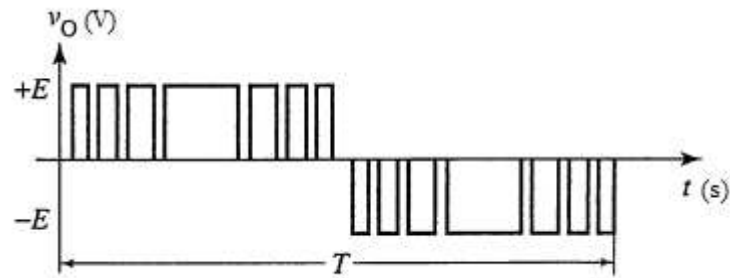
$$N = \frac{f_p}{f}, \quad (2)$$

(AHMED, 2000). Este método apresenta um conteúdo harmônico menor que o método do pulso simples.

2.1.3 PWM Senoidal

Também é conhecido como (SPWM). Neste método, é utilizado como onda fundamental, uma senoide, e fazendo com que durante o pico da onda fundamental o intervalo de chave ligada seja maior, ou seja, tem uma largura de pulso variável. A Figura 3 mostra um padrão geral para este método.

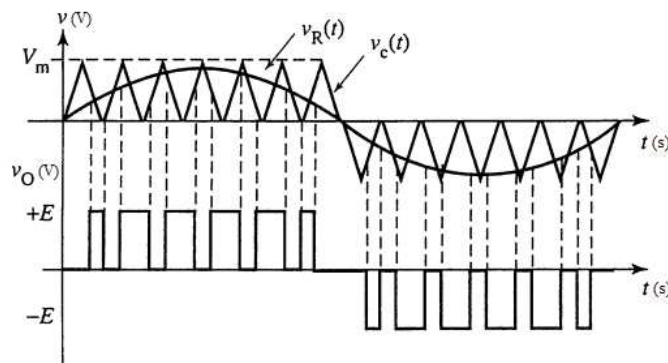
Figura 3 – Forma de onda típica do método de modulação SPWM.



Fonte: Adaptado de Ahmed (2000) .

O intervalo de chaveamento é determinado através da frequência das ondas, como é possível ser observado na Figura 4. Onde v_R é a onda fundamental, v_c é a onda portadora e V_m a amplitude. Os pontos onde elas se interceptam são os pontos de chaveamento e a largura do pulso é determinado pelo intervalo de tempo em que $v_c < v_R$, no semiciclo positivo, e o intervalo de tempo em que $v_c > v_R$, no semiciclo negativo (AHMED, 2000).

Figura 4 – Forma de onda modulada por SPWM.



Fonte: Adaptado de Ahmed (2000) .

O controle da tensão de saída é feita através de dois parâmetros: o número de pulsos (N) e o índice de modulação (M). O índice de modulação é a relação entre a amplitude da onda fundamental e a portadora

$$M = \frac{A_r}{A_p}, \quad (3)$$

onde A_r é a amplitude da fundamental e A_p a amplitude da portadora, sendo ele entre 0 e 1, e determina a largura dos pulsos (AHMED, 2000).

A amplitude da tensão de saída $v_{o_{max}}$ pode ser calculada com

$$v_{o_{max}} = M.E, \quad (4)$$

onde, E é a tensão da fonte. Já o valor eficaz $v_{o_{ef}}$ calcula-se com

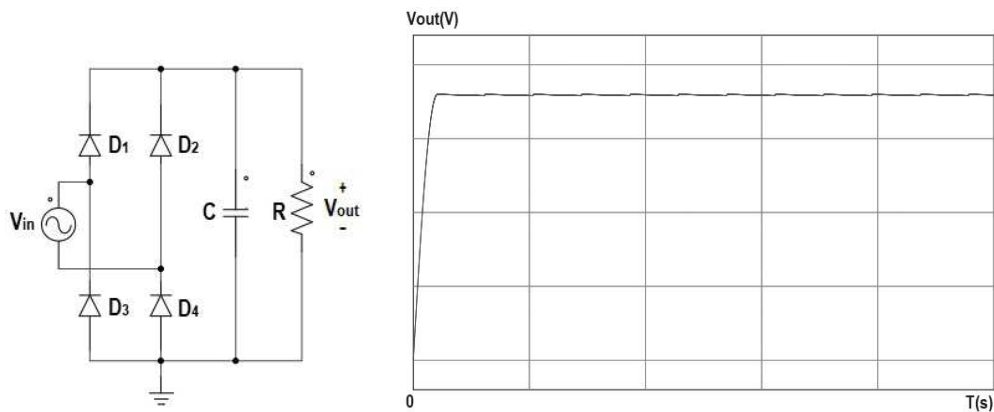
$$v_{o_{ef}} = \frac{v_{o_{max}}}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

(BARBI, 2008). Ou seja, o parâmetro M é responsável pelo controle da amplitude da tensão de saída. Este método tem como função principal eliminar as harmônicas de baixa ordem (BARBI, 2008).

2.2 Retificador de Onda Completa em Ponte e Barramento CC

O retificador de onda completa, também chamado de ponte retificadora, apresenta o circuito da Figura 5 composto por quatro diodos, que exercem o papel de retificar a onda no seu ciclo negativo para positivo, e em sua saída é adicionado um capacitor, que tem como função filtrar o sinal de saída do retificador mantendo o nível constante na saída, sobre a carga R .

Figura 5 – Circuito da ponte retificadora de onda completa com filtro capacitivo e sua forma de onda da saída.



Fonte: Autoria própria baseada em Razavi (2010).

Considerando os diodos ideais, para $V_{in} < 0$, os diodos D_2 e D_3 estão ligados gerando $V_{out} = -V_{in}$. E se $V_{in} > 0$, os diodos D_1 e D_4 estão ligados gerando $V_{out} = V_{in}$. Usando o capacitor para manter um nível aproximadamente constante na saída, tendo um *ripple* baixo podendo ser calculado com

$$V_R \approx \frac{1}{2} \frac{V_p - 2V_{D,on}}{RC_1f}, \quad (6)$$

onde V_R é a tensão de *ripple*, V_p tensão de pico, $V_{D,on}$ tensão do diodo quando conduzindo e R a carga (RAZAVI, 2010).

2.3 Conversores CC-CA Monofásicos

A função básica de um conversor CC-CA (inversor) é transformar um sinal proveniente de uma fonte de alimentação contínua em um sinal periódico de frequência fixa e amplitude alternada (BARBI, 2008). Para isso, utilizam-se chaves estáticas semicondutoras, as quais podem ser: transistor de junção bipolar (TBJ), transistor de efeito de campo de óxido-metal-semicondutor (MOSFET), transistor bipolar de porta isolada (IGBT) e tiristor de porta desativada (GTO).

Os inversores podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte alternada que se deseja na saída: fonte ideal de corrente (CSI), regulado em corrente e fonte de tensão (VSI).

O CSI apresenta como fonte de alimentação uma fonte de corrente contínua de nível constante na entrada do inversor. Essa classe é frequentemente utilizada para acionamento de máquinas CA trifásicas pelo fato de ser uma forma de controle que permite a frenagem regenerativa da máquina e ter proteção contra sobrecorrente (BARBI, 2008).

O inversor regulado em corrente, diferentemente do CSI, apresenta uma fonte de tensão contínua na sua entrada. Eles se dividem em dois grupos: inversor regulado em corrente com controle por histerese e inversor regulado em corrente com controle por PWM. O inversor com controle por histerese apresenta uma frequência de chaveamento variável. O inversor controlado por PWM, por sua vez, tem a frequência de chaveamento fixa (BARBI, 2008).

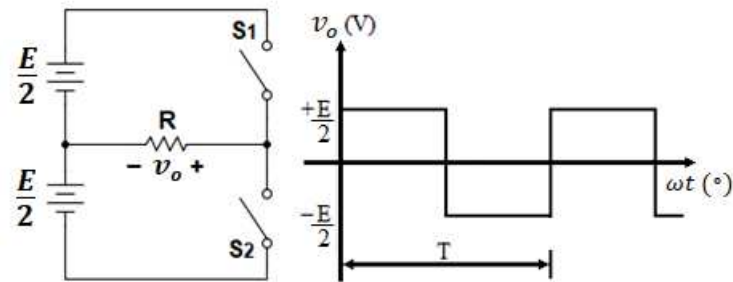
Tanto o CSI quanto o inversor regulado em corrente não são o objeto de estudo deste trabalho, mais detalhes podem ser encontrados em (BARBI, 2008) ou (AHMED, 2000).

O VSI é o tipo de inversor mais comum. Ele pode ser alimentado a partir de qualquer fonte de tensão contínua, por exemplo, banco de baterias e redes de painéis fotovoltaicos. Este inversor pode ser destinado para controlar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão contínua e uma carga com características de tensão alternada, monofásica ou trifásica, com controle do nível de tensão e da frequência de saída. Possui três tipos de configuração que são: meia-ponte, ponte completa e *push-pull*.

A configuração em meia ponte possui apenas um braço inversor composto por um único par de chaves (S) comandadas e necessita de uma fonte de alimentação CC (E) com ponto médio, no caso da carga ser indutiva, é necessário a conexão em antiparalelo de diodos de roda-livre para evitar que a tensão de carga torne-se instantaneamente negativa. A Figura 6 representa um circuito básico do inversor monofásico em configuração de meia-ponte e a sua forma de onda da tensão de saída.

Suas chaves são ligadas de forma intercalada. Esta configuração apresenta quatro estados – Tabela 1 – de acordo com a situação em que se encontram as chaves: aberta ou fechada. No estado 1, como mostra a Figura 7, a chave S_1 está fechada, possibilitando a passagem da corrente (i) e a tensão (v_o) sobre a carga (R) é a mesma apresentada pela fonte, ou seja, $+E/2$. Já no estado 3, como mostra a Figura 7, a chave S_2 está fechada, produzindo uma tensão de $-E/2$ sobre a carga. Os estados 2 e 4 são etapas de transição, para uma carga puramente resistiva estes estados servem para proteção contra curto circuito, evitando que as duas chaves conduzam ao mesmo tempo. Já para cargas indutivas, são acionados os diodos em paralelo com cada chave

Figura 6 – Circuito básico de um inversor em meia ponte e a forma de onda da tensão de saída na carga.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

para permitir a circulação da corrente de carga durante a abertura das chaves (BARBI, 2008).

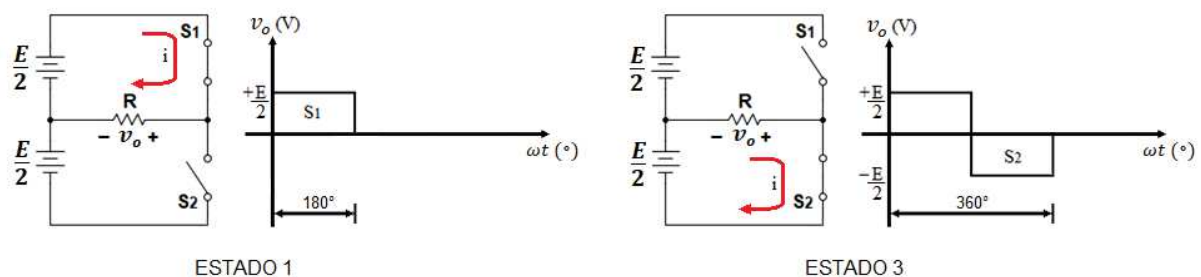
O período do sinal alternado é determinado pelos intervalos de chaveamento.

Tabela 1 – Estados do chaveamento do inversor em meia-ponte.

ESTADOS	CHAVE FECHADA	CHAVE ABERTA	TENSÃO DE SAÍDA $v_o(V)$
1	S1	S2	$+E/2$
2	—	S1 e S2	0
3	S2	S1	$-E/2$
4	—	S1 e S2	0

Fonte: Autoria própria.

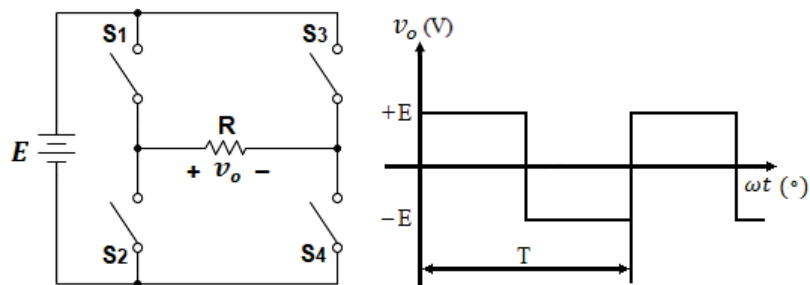
Figura 7 – Circuito básico de um inversor em meia ponte no estado 1 e estado 3 de condução.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

Outra configuração utilizada em inversores monofásicos é denominada ponte completa. A configuração se caracteriza por apresentar dois braços inversores compostos por um par de chaves semicondutoras estáticas como apresentada na Figura 8; S_1 , S_2 , S_3 e S_4 são as chaves estáticas comandadas para gerar o sinal alternado, e para o caso de cargas indutivas, diodos de roda-livre são necessários para cada chave. Assim como a meia ponte, também apresenta quatro estados, apresentados na Tabela 2.

Figura 8 – Circuito básico de um inversor em ponte completa e a forma de onda da tensão de saída na carga.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

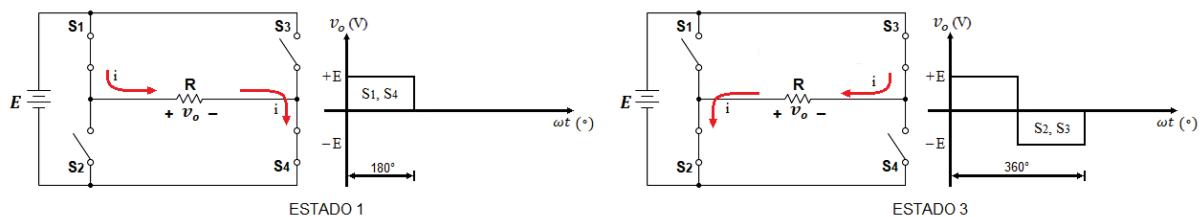
Tabela 2 – Estados do chaveamento do inversor em ponte completa.

ESTADOS	CHAVE FECHADA	CHAVE ABERTA	TENSÃO DE SAÍDA $V_o(V)$
1	$S1$ e $S4$	$S2$ e $S3$	$+E$
2	–	$S1, S2, S3$ e $S4$	0
3	$S2$ e $S3$	$S1$	$-E$
4	–	$S1, S2, S3$ e $S4$	0

Fonte: Autoria própria.

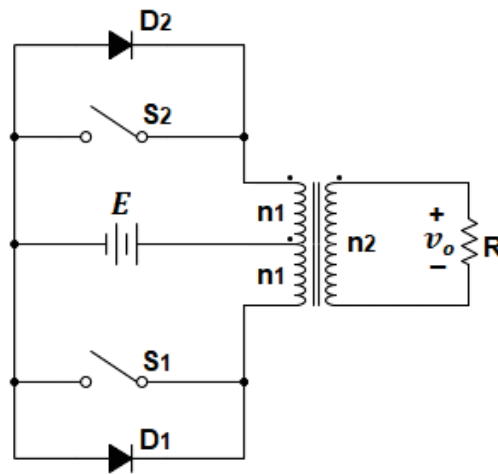
No estado 1 representado pela Figura 9, onde apenas S_1 e S_4 estão fechadas, a tensão de saída na carga é de $+E$. E no estado 3 representado na Figura 9, onde apenas S_2 e S_3 estão fechadas a tensão de $-E$ na carga, gerando a forma de onda apresenta na Figura 8.

Figura 9 – Circuito básico de um inversor em ponte completa e a forma de onda da tensão de saída na carga para o estado 1 e estado 3 de condução.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

E, por último, a configuração *push-pull*, uma das primeiras a ser utilizada em indústrias, é bem adaptada para aplicações de baixas frequências e baixas potências e tem como algumas características uma estrutura naturalmente isolada empregando um transformador com ponto médio no primário, apenas duas chaves estáticas comandadas, a carga é isolada da fonte de alimentação CC e a fonte de alimentação CC e as chaves estáticas comandadas estão ligadas na mesma referência (BARBI, 2008). A Figura 10 apresenta o inversor *push-pull*. Mais informações em (BARBI, 2008).

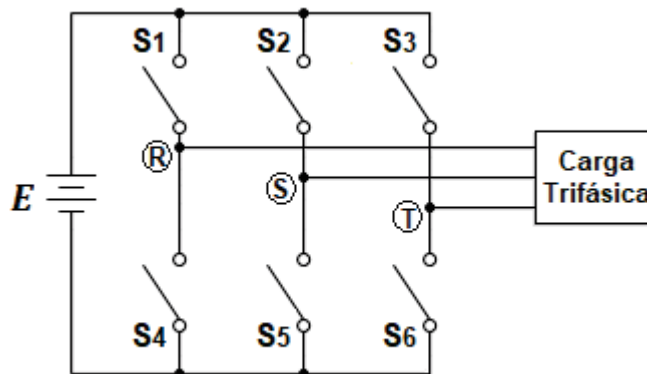
Figura 10 – Inversor *push-pull*.

Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

2.4 Conversores CC-CA Trifásico

Os conversores CC-CA trifásicos são comumente empregados em aplicações industriais. Esta estrutura é uma maneira eficiente de se obter tensões trifásicas com frequência controlável. O circuito básico é apresentado na Figura 11. Em aplicações com cargas indutivas usualmente se utiliza transistores de potência, pois estes já possuem o diodo de roda-livre em sua estrutura interna.

Figura 11 – Estrutura básica de um inversor trifásico em ponte completa.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

A estrutura trifásica apresenta três braços inversores monofásicos em meia ponte, e cada braço representa uma fase do sistema trifásico, que é conectada à carga trifásica; suas fases são representadas pelas letras *R*, *S* e *T*. O funcionamento do inversor trifásico se assemelha ao inversor monofásico em ponte completa. O VSI em ponte apresenta dois tipos de operação de comutação: 180° e 120° . A diferença básica entre os dois tipos é o tempo de condução de cada

chave estática semicondutora.

2.4.1 Inversor de fonte de tensão trifásico tipo 120°

No VSI trifásico de operação tipo 120° , há um intervalo de 60° entre os comandos de duas chaves controladas pertencentes a um mesmo braço do inversor para evitar que entrem em condução ao mesmo tempo acarretando um curto-circuito entre duas fases diferentes. Consequentemente, em qualquer instante de tempo, somente duas chaves controladas estarão em condução. Os comandos das chaves controladas de um dado braço são defasados de 120° em relação aos comandos dos braços vizinhos (BARBI, 2008).

Neste contexto, há uma sequência de operação em seis etapas em um período da forma de onda da tensão de saída. Uma chave controlada é posta em condução a cada intervalo de 60° . A Tabela 3 apresenta a sequência de chaveamento do inversor trifásico de tensão em ponte tipo 120° representado na Figura 11.

Tabela 3 – Sequência de chaveamento do inversor trifásico tipo 120° .

ESTADOS	INTERVALOS DE CONDUÇÃO ($^\circ$)	CHAVE EM CONDUÇÃO
1	$0^\circ - 60^\circ$	$S1 - S5$
2	$60^\circ - 120^\circ$	$S1 - S6$
3	$120^\circ - 180^\circ$	$S2 - S6$
4	$180^\circ - 240^\circ$	$S2 - S4$
5	$240^\circ - 300^\circ$	$S3 - S4$
6	$300^\circ - 360^\circ$	$S3 - S5$

Fonte: Autoria própria.

Para a análise matemática de uma forma mais simplificada do circuito da Figura 11, a fonte de alimentação CC será dividida em duas tensões de valor $E/2$ e uma referência O , como mostrado na Figura 12.

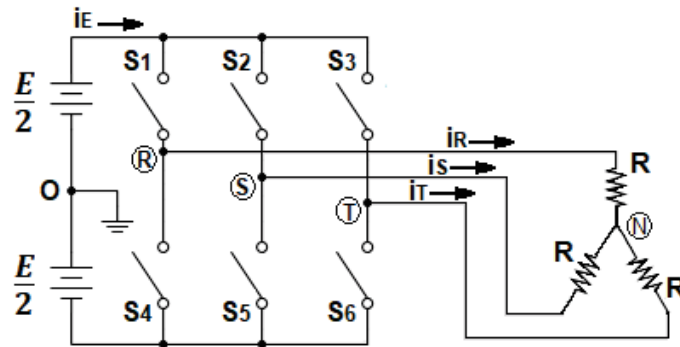
2.4.1.1 Carga resistiva conectada em estrela (Y)

Para uma carga balanceada puramente resistiva conectada em estrela (Y), como mostrado na Figura 12, as tensões de linha são as tensões entre fase-fase e as tensões de fase são as tensões entre fase-referência. Seguindo a sequência de chaveamento apresentado na Tabela 3, pode se obter as tensões de fase (v_{RN}, v_{SN}, v_{TN}) durante um período completo de operação, esses valores são apresentados na Tabela 4.

E a partir das tensões de fase pode-se obter as tensões de linha (v_{RS}, v_{ST}, v_{TR}), como representa o sistema

$$\begin{cases} v_{RS} = v_{RN} - v_{SN}, \\ v_{ST} = v_{SN} - v_{TN}, \\ v_{TR} = v_{TN} - v_{RN}. \end{cases} \quad (7)$$

Figura 12 – Inversor trifásico de tensão em ponte alimentando uma carga trifásica balanceada puramente resistiva conectada em Y.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

Tabela 4 – Tensões de fase em cada intervalo de chaveamento para uma carga puramente resistiva conectada em Y.

ESTADO	$v_{RN}(\text{V})$	$v_{SN}(\text{V})$	$v_{TN}(\text{V})$
1	$+E/2$	$-E/2$	0
2	$+E/2$	0	$-E/2$
3	0	$+E/2$	$-E/2$
4	$-E/2$	$+E/2$	0
5	$-E/2$	0	$+E/2$
6	0	$-E/2$	$+E/2$

Fonte: Autoria própria.

A partir destas tensões de fase e linha, é possível obter as formas de onda representadas na Figura 13. O valor eficaz total da tensão de fase (V_{Fef}) pode ser determinada por

$$V_{Fef} = \frac{E}{\sqrt{6}} \approx 0,41E, \quad (8)$$

e o valor eficaz total da tensão de linha (V_{Lef}) pode ser calculado com

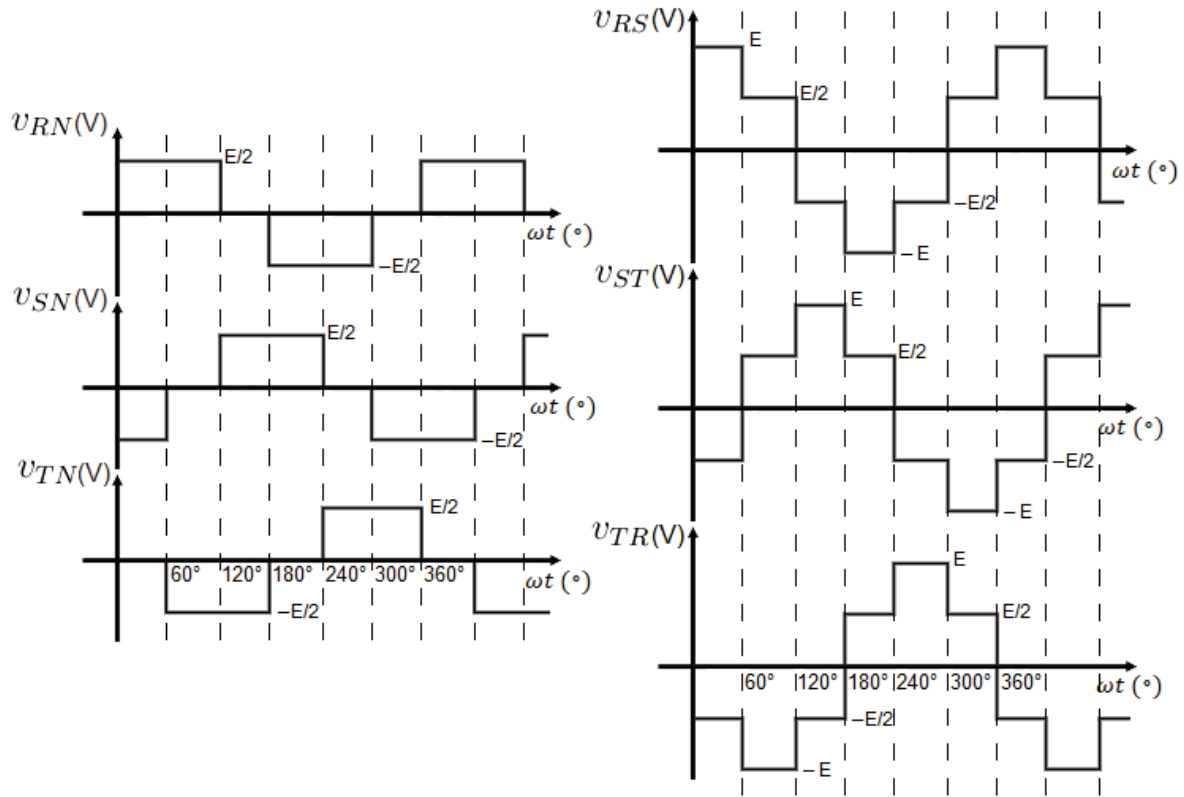
$$V_{Lef} = \frac{E}{\sqrt{2}} \approx 0,71E, \quad (9)$$

(BARBI, 2008).

Para o cálculo das correntes de fase (i_R, i_S, i_T) basta aplicar o sistema

$$\begin{cases} i_R = \frac{v_{RN}}{R}, \\ i_S = \frac{v_{SN}}{R}, \\ i_T = \frac{v_{TN}}{R}. \end{cases} \quad (10)$$

Figura 13 – Formas de onda das tensões de fase e de linha do Inversor trifásico tipo 120° com uma carga em Y.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

onde R é o valor de resistência da carga. Pelo fato da carga ser puramente resistiva, a forma de onda das correntes de fase é semelhante a forma de onda das tensões de fase. As formas de onda das correntes de fase são apresentadas na Figura 14.

O valor eficaz total da corrente de linha (I_{Lef}) é calculado com

$$I_{Lef} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{E}{R} \approx 0,41 \frac{E}{R}, \quad (11)$$

(BARBI, 2008).

A potência média dissipada por fase (P_F) é calculada com

$$P_F = RI_{Lef}^2 = R \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{E}{R} \right)^2 = \frac{E^2}{6R}, \quad (12)$$

(BARBI, 2008). A potência média total trifásica ($P_{3\phi}$) é obtida com

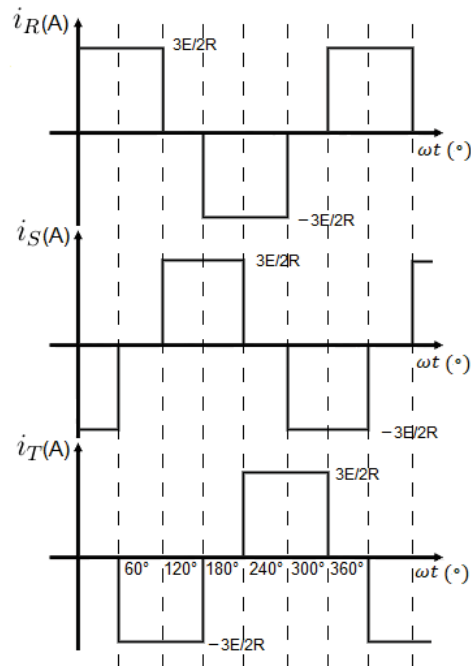
$$P_{3\phi} = 3P_F = 3 \left(\frac{E^2}{6R} \right) = \frac{E^2}{2R}, \quad (13)$$

(BARBI, 2008).

Desprezando as perdas internas do inversor, a potência de entrada (P_E) pode ser calculada com

$$P_E = EI_{Emd} = P_{3\phi}, \quad (14)$$

Figura 14 – Formas de onda das correntes de fase do inversor trifásico tipo 120° com uma carga em Y.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

onde I_{Emd} é a corrente média de entrada. A partir da Equação 14, obtém-se a corrente média da fonte de alimentação

$$I_{Emd} = \frac{E}{2R}. \quad (15)$$

A corrente média nas chaves (I_{Smd}) pode ser calculada com

$$I_{Smd} = \frac{I_{Emd}}{3} = \frac{E}{6R}, \quad (16)$$

e a corrente eficaz nas chaves controladas pode ser encontrada de acordo com

$$I_{Seff} = \frac{I_{Leff}}{\sqrt{2}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{E}{R}\right)}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{E}{R} \approx 0,29 \frac{E}{R}. \quad (17)$$

2.4.2 Inversor de fonte de tensão trifásico tipo 180°

O VSI trifásico de operação tipo 180° é mais empregado pelos motivos das chaves semicondutores serem melhor aproveitadas quando estão conduzindo por 180° e pela forma de onda da tensão de saída não ser afetada pelo tipo de carga. Como cada chave controlada conduz por 180° elas são, portanto, mais utilizadas quando comparadas com as do inversor tipo 120°.

Neste modo de operação, três chaves conduzem ao mesmo tempo, sendo duas pertencentes a um grupo distinto do grupo da terceira chave. Esses grupos são divididos em dois: o positivo e o negativo. Onde o grupo da chave irá depender em qual polaridade da fonte ela está conectada.

2.4.2.1 Carga resistiva conectada em estrela (Y)

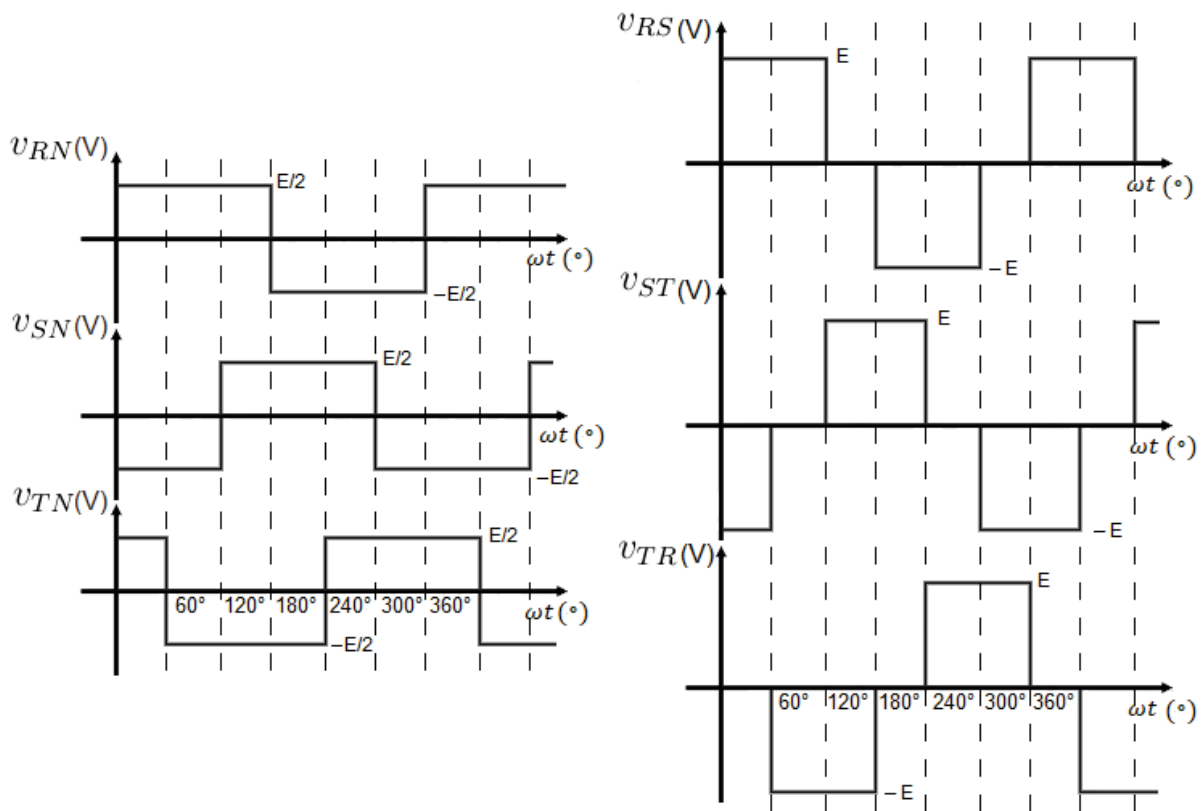
Para uma carga resistiva conectada em Y o inversor possui seis seqüências de operação descritos na Tabela 5. Conforme o chaveamento apresentado pela Tabela 5, obtêm-se as tensões de fase, as quais são apresentadas graficamente na Figura 15. Por meio da Equação 7, calcula-se as tensões de linha, cujas formas de onda são apresentadas na Figura 15.

Tabela 5 – Seqüência de chaveamento do inversor trifásico tipo 180°.

ESTADOS	INTERVALOS DE CONDUÇÃO (°)	CHAVE EM CONDUÇÃO
1	0° – 60°	$S1 - S5 - S3$
2	60° – 120°	$S1 - S5 - S6$
3	120° – 180°	$S1 - S2 - S6$
4	180° – 240°	$S4 - S2 - S6$
5	240° – 300°	$S4 - S2 - S3$
6	300° – 360°	$S4 - S5 - S3$

Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Formas de onda das tensões de fase e de linha do Inversor trifásico tipo 180° com uma carga em Y .



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

A tensão eficaz de linha é calculada com

$$V_{Lef} = \sqrt{\frac{2}{3}} E \approx 0,816E. \quad (18)$$

Comparando com a Equação 9, nota que a tensão eficaz de linha do tipo 180° é maior que do tipo 120°. A corrente eficaz de fase é calculada com

$$I_{Fef} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{E}{R} \approx 0,47E, \quad (19)$$

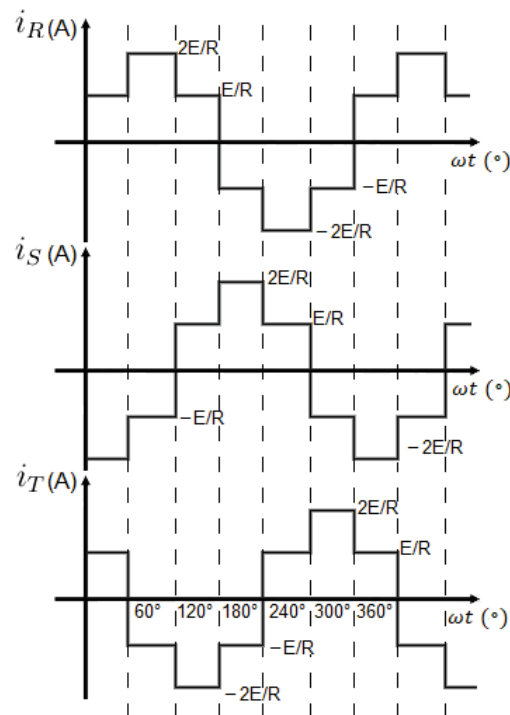
(BARBI, 2008).

Considerando a Figura 12, as correntes de fase podem ser encontradas utilizando-se a Equação 10, suas formas de onda são apresentadas pela Figura 16. O valor eficaz da corrente de fase pode ser obtido a partir da corrente de fase por meio de

$$I_{Fef} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{E}{R} \approx 0,47 \frac{E}{R}, \quad (20)$$

(BARBI, 2008).

Figura 16 – Formas de onda das correntes de fase do Inversor trifásico tipo 180° com uma carga em Y.



Fonte: Autoria própria baseada em Barbi (2008).

A potência média dissipada por fase na carga é calculada com

$$P_F = RI_{Fef}^2 = R \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{E}{R} \right)^2 = \frac{2}{3} \frac{E^2}{R}, \quad (21)$$

(BARBI, 2008). Já a potência média trifásica dissipada na carga por

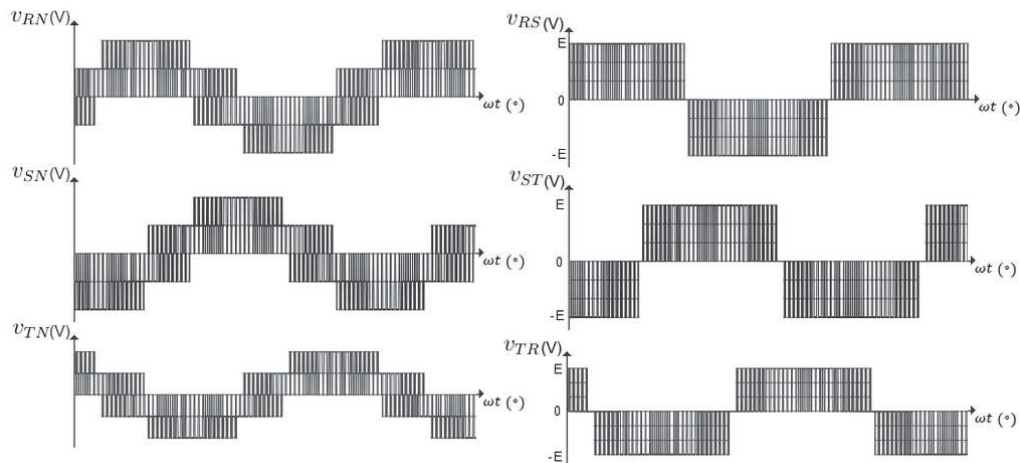
$$P_{3\phi} = 3P_F = 3 \left(\frac{2 E^2}{3 R} \right) = 2 \frac{E^2}{R}, \quad (22)$$

(BARBI, 2008).

2.4.2.2 Carga resistiva conectada em estrela (Y) com SPWM

Fazendo uso da técnica de SPWM, subseção 2.1.3, para acionamento das chaves, as formas de onda das tensões de fase e linha apresentam características devido a modulação como é possível observar pela Figura 17. Neste método, as chaves estáticas conduzem e desligam rapidamente de acordo com os índices de modulação, apresentados na subseção 2.1.3, diferentemente do método de acionamento de 120° e 180° , onde as chaves ficam um período maior conduzindo e desligadas.

Figura 17 – Formas de onda das tensões de fase e de linha do Inversor trifásico tipo 180° com uma carga em Y e modulação SPWM.



Fonte: Autoria própria.

Para controlar a tensão máxima de saída basta regular o índice de modulação, como mostrado na subseção 2.1.3.

2.5 Parâmetros de Desempenho

Sem o devido tratamento, a tensão de saída do inversor apresenta um alto conteúdo harmônico. Para saber se o inversor desempenha seu papel com qualidade, são avaliados alguns parâmetros como: Distorção Harmônica Total (THD), Fator de Distorção (FD) e Harmônico de Mais Baixa Ordem (HBO) (BARBI, 2008).

A THD indica o quanto a forma de onda está distorcida em relação a componente fundamental e é calculada com

$$THD = \frac{1}{V_{o1ef}} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{onef}^2}, \quad (23)$$

onde V_{o1ef} é o valor eficaz da componente fundamental e V_{onef} representa o valor eficaz do "n-ésimo" componente harmônico (BARBI, 2008).

O FD apresenta a quantia de distorção harmônica em uma forma de onda particular, após os harmônicos daquela forma de onda terem sido submetidos a uma atenuação de segunda ordem, ou seja, divisão por n^2 . O FD é calculado com

$$FD = \frac{1}{V_{o1ef}} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_{onef}}{n^2} \right)^2}, \quad (24)$$

(BARBI, 2008).

Para um componente individual o FD é calculado com

$$FD_n = \frac{V_{onef}}{n^2 V_{o1ef}}, \quad (25)$$

(BARBI, 2008).

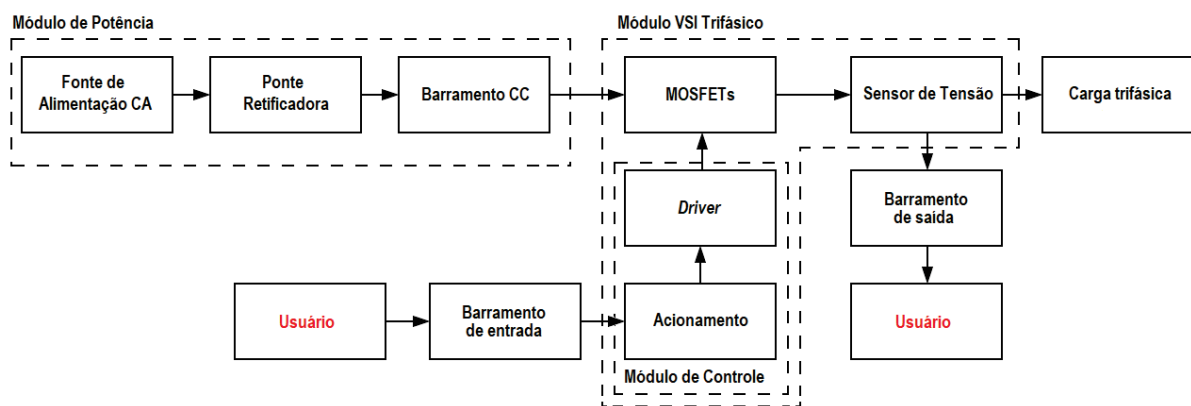
O HBO é a componente cuja frequência está mais próxima da fundamental, e amplitude maior ou igual a 3% da fundamental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento do projeto.

Na Figura 18 é apresentada na forma de diagrama de blocos a composição do sistema formado. Ele é constituído de 3 módulos: de potência, inversor trifásico e de controle. Cada um módulo será descrito nas próximas seções.

Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema completo com todos os módulos necessários para a validação.



Fonte: Autoria própria.

Os barramentos de entrada e saída são as áreas de acesso do usuário. Na entrada para a injeção dos sinais de SPWM e na saída para dados dos sensores.

Os requisitos do projeto são descritos na Tabela 6. A Figura 32 (Apêndice A) apresenta o esquemático elétrico completo do sistema do VSI trifásico.

Tabela 6 – Requisitos do sistema.

REQUISITOS	DESCRIÇÃO
Potência de saída	100 W
Tensão de saída	$127 V_{RMS} - 180 V_{MAX}$
Frequência	60 Hz

Fonte: Autoria própria.

3.1 Metodologia e materiais para implementação do módulo VSI trifásico

Nesta seção será apresentado a metodologia adotada para implementação do módulo VSI trifásico e os materiais utilizados, expondo os módulos e suas composições. Posteriormente, apresentando os blocos integrantes do sistema.

Todos os componentes utilizados no módulo VSI trifásico são apresentados na Tabela 7, suas quantidades e preços segundo o site de venda de componentes pesquisado (MOUSER, 2007).

Tabela 7 – Componentes utilizados para confecção do módulo VSI trifásico.

COMPONENTE	QUANTIDADE	VALOR TOTAL EM R\$
Capacitores eletrolíticos diversos valores	4	4,25
Capacitores despolarizado diversos valores	5	2,13
Resistores diversos valores	21	8,93
LM7805 (regulador de tensão)	1	6,50
74LS04 (porta lógicas inversoras)	1	3,10
IR2130 (<i>driver</i>)	1	49,73
1N4007 (diodo)	3	3,06
IRF740 (MOSFET)	6	39,02
Placa de Circuito Impresso	1	4,86
TOTAL		121,58

Fonte: Aatoria própria.

Efetuada uma breve comparação com o valor apresentado no Capítulo 1, o módulo desenvolvido possui um valor de custo 1,22 R\$/W. Considerando os fatores de logística, fabricação, segurança e comercialização, o módulo desenvolvido apresenta um valor próximo aos módulos presentes no mercado.

3.1.1 Módulo de Potência

Fazem parte do módulo de potência: alimentação de tensão CA, ponte retificadora e barramento CC. Para atender as requisitos propostos na Tabela 6 fez-se necessário utilizar os componentes com as especificações descritas a seguir. Na Tabela 8 são apresentados de forma resumida e quantitativa.

Para a ponte retificadora foi escolhido o diodo 6A10 com um suporte para tensão de até 1000 V e uma corrente média retificada de 6 A, mais informações são encontradas no *datasheet* (CONTINENTAL DEVICE INDIA LIMITED, 2007). Já para o barramento CC os capacitores necessários foram calculados através da Equação 6 considerando um *ripple* de 5 %, um V_P de 179,6 V, $V_{D,on}$ de 1,1 V, R de 129,6 Ω e f de 60 Hz chegando num valor de 1270,3 μF utilizando-se uma associação com 8 capacitores de 680 μF .

Na alimentação do módulo de potência utilizou-se um *variac*, modelo TDGC2-2 da JNG, por permitir um aumento gradual, de 10 em 10 V, da tensão de entrada, evitando possíveis acidentes durante os testes de bancada.

3.1.2 Módulo inversor VSI trifásico

Este módulo é constituído pelas chaves estáticas, o módulo de controle e o sensor de tensão. Os componentes utilizados para a confecção são apresentados de forma resumida e

Tabela 8 – Componentes para confecção do módulo de potência utilizado para validação.

COMPONENTES	DESCRIÇÃO
Ponte Retificadora	4 diodos 6A10
Barramento CC	8 capacitores de $680 \mu F @ 100 V$
Alimentação CA	<i>variac</i>

Fonte: Aatoria própria.

quantitativa na Tabela 9.

Utilizou-se para as chaves, como visto na Figura 11, o MOSFET IRF740, suportando tensão de 400 V, corrente de 10 A e resistência de $0,55 \Omega$ quando em condução (INTERNACIONAL RECTIFIER, 2008). A Figura 32 (Apêndice A) apresenta as chaves MOSFETs.

3.1.2.1 Módulo de Controle

Acoplado ao módulo inversor, o módulo de controle tem como objetivo controlar o acionamento das chaves através de um sinal de PWM ou SPWM sendo tomadas as devidas precauções para evitar que as chaves pertencentes ao mesmo braço conduzam simultaneamente. Constitui-se de um (CI) de portas lógicas inversoras e um *driver*.

Obtou-se pelo CI 74LS04, responsável por inverter o sinal através de portas lógicas inversoras (NOT), assim evitando a condução simultânea de chaves do mesmo braço. O CI apresenta como especificação elétrica uma tensão de entrada de 5 V e mais detalhes, como o diagrama interno, podem ser encontrados no *datasheet* do componente (MOTOROLA, 2005).

Para fazer a alimentação elétrica do CI 74LS04, utilizou-se um regulador de tensão LM7805, o qual apresenta como características elétricas uma tensão de entrada de até 40 V e de saída 5 V. Mais detalhes do componente são apresentados no *datasheet* (FAIRCHILD, 2005).

Outro componente que faz parte do módulo de controle é o *driver*. Selecionou-se o CI IR2130, tendo como tensão operacional de 600 V, três canais de saída de referência independente para as chaves superiores e para as chaves inferiores e três canais flutuantes para operação em *bootstrap*, onde o princípio de funcionamento é fornecer uma tensão no *gate* do MOSFET igual a soma de V_{GS} e a tensão sobre a carga. O encapsulamento, bem como o diagrama interno, são apresentados no *datasheet* do componente (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2004).

Utilizou-se a técnica de modulação SPWM (2.1.3), tendo como onda fundamental uma senoide de 60 Hz de frequência e uma onda portadora triangular de 3,9 kHz. Gerando os três sinais necessários a partir de um microcontrolador ATMEGA328 da ATMEL, junto ao módulo Arduino UNO. Este microcontrolador possui uma resolução de 8 *bits*, 32 registradores de propósito geral, 6 saídas PWM e diversos outros periféricos e funcionalidades. Mais detalhes sobre o microcontrolador são encontrados no *datasheet* (ATMEL, 2010).

Na alimentação do módulo de controle utilizou-se uma fonte de bancada modelo FA-3030 da Instrutherm (INSTRUTHERM, 2008), fornecendo 15 V.

3.1.2.2 Sensor de tensão

Optou-se por utilizar um divisor resistivo como sensor de tensão os valores de $946\text{ k}\Omega$ e $27\text{ k}\Omega$, valores escolhidos para obter uma alta impedância na entrada do divisor e na saída uma tensão de até 5 V . Na Figura 32 (Apêndice A) é possível observar os sensores conectados a cada fase do inversor VSI trifásico.

Tabela 9 – Componentes utilizados para o módulo VSI trifásico.

COMPONENTES	DESCRIÇÃO
Chaves Estáticas	6 MOSFETs IRF740
<i>Driver</i>	1 IR2130
Porta lógica inversora	1 74LS04
Sensores de Tensão	3 resistores de $910\text{ k}\Omega$, 3 resistores de $36\text{ k}\Omega$ e 3 resistores de $27\text{ k}\Omega$

Fonte: Aatoria própria.

3.1.3 Barramentos de Entrada e de Saída

O barramento de entrada é onde o usuário irá inserir o sinal para o chaveamento do inversor. Este sinal pode ser oriundo de um circuito ou de um microcontrolador. O sinal será tratado internamente por um circuito lógico para ser direcionado corretamente para cada chave. E os sinais de tensão para os módulos de potência e controle.

O barramento de saída será onde os dados dos sensores de tensão podem ser obtidos para o devido tratamento ou para análise de controle em malha fechada, tendo como nível de tensão máximo 5 V .

3.2 Metodologia e materiais para validação do módulo VSI trifásico

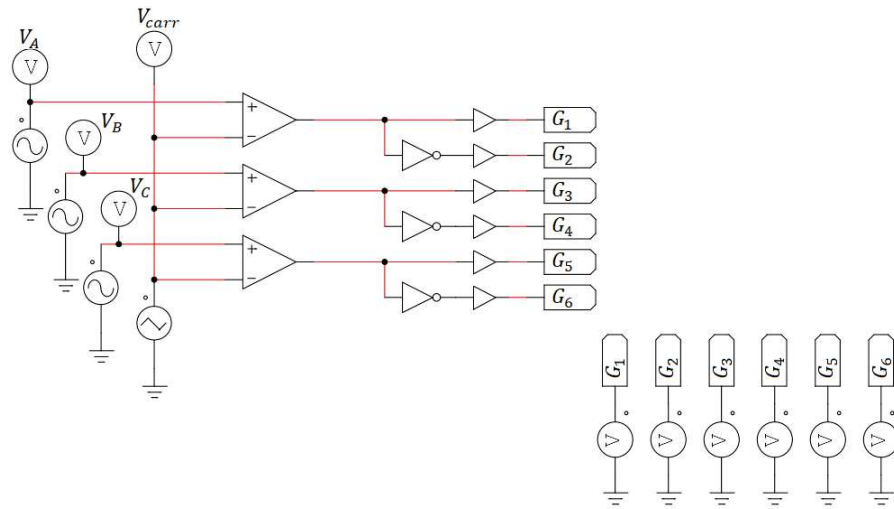
Nesta seção, serão apresentadas as metodologias adotadas para a validação do funcionamento do módulo VSI trifásico.

3.2.1 Simulações computacionais

As simulações dos circuitos foram feitas no *software* simulador de circuitos PSIM. De forma separada, foram gerados os sinais de SPWM, comparando os sinais quanto a sua defasagem e complementaridade. Além destas simulações, também foi simulado o sistema completo com o inversor e o controle para coletar as formas de onda das tensões de fase e linha para uma carga trifásica em Y.

Nos testes para geração do SPWM foi utilizado o circuito apresentado na Figura 19, onde V_A , V_B e V_C são os sinais das senoides fundamentais com frequência de 60 Hz e defasadas em 120° , V_{carr} é o sinal da portadora triangular com frequência de 4 kHz e G_1 , G_2 , G_3 , G_4 , G_5 e G_6 são *labels* para os *gates* dos MOSFETs.

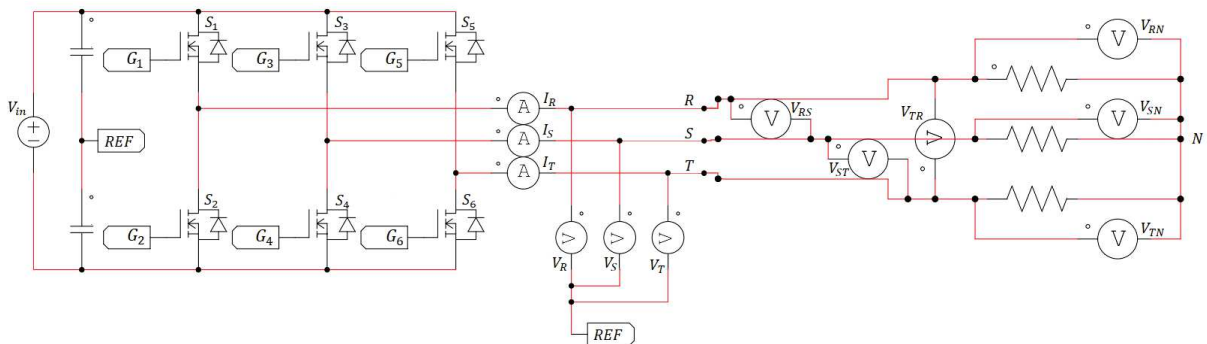
Figura 19 – Esquemático utilizado em *software* para geração do sinal de SPWM.



Fonte: Autoria própria.

Para a simulação do VSI trifásico foi utilizado cargas trifásicas em Y com valores de $100\ \Omega$, apresentado esquematicamente pela Figura 20.

Figura 20 – Esquemático utilizado em *software* para simulação do VSI trifásico com carga de $100\ \Omega$ conectado em Y.



Fonte: Autoria própria.

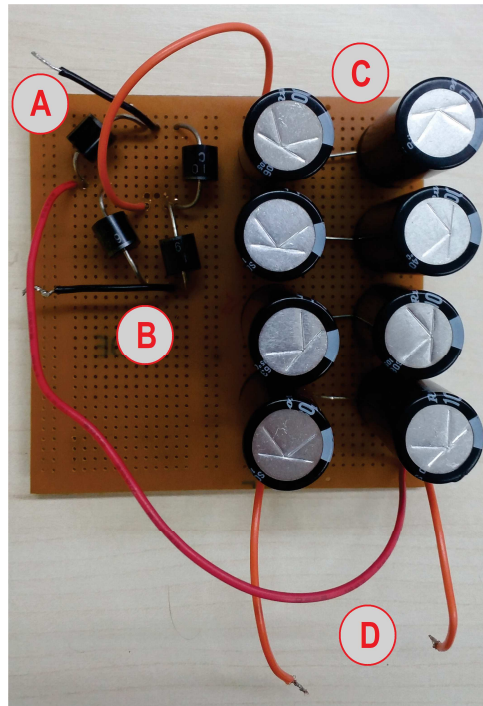
Formas de onda das tensões de fase V_{RN} , V_{SN} e V_{TN} e tensões de linha V_{RS} , V_{ST} e V_{TR} foram coletadas.

3.2.2 Implementação prática

Após as simulações, montou-se os circuitos em PCIs para testes. Iniciando pelo circuito do módulo de potência, testando assim a retificação da tensão CA em uma tensão CC através da placa apresentada pela Figura 21.

Em seguida, montou-se o módulo VSI trifásico, apresentado na Figura 22. Iniciou-se os testes pela geração do sinal de SPWM e seu complementar. Posteriormente, testou-se as chaves MOSFET sendo alimentadas com uma tensão CC de 15 V e uma carga de trifásica equilibrada

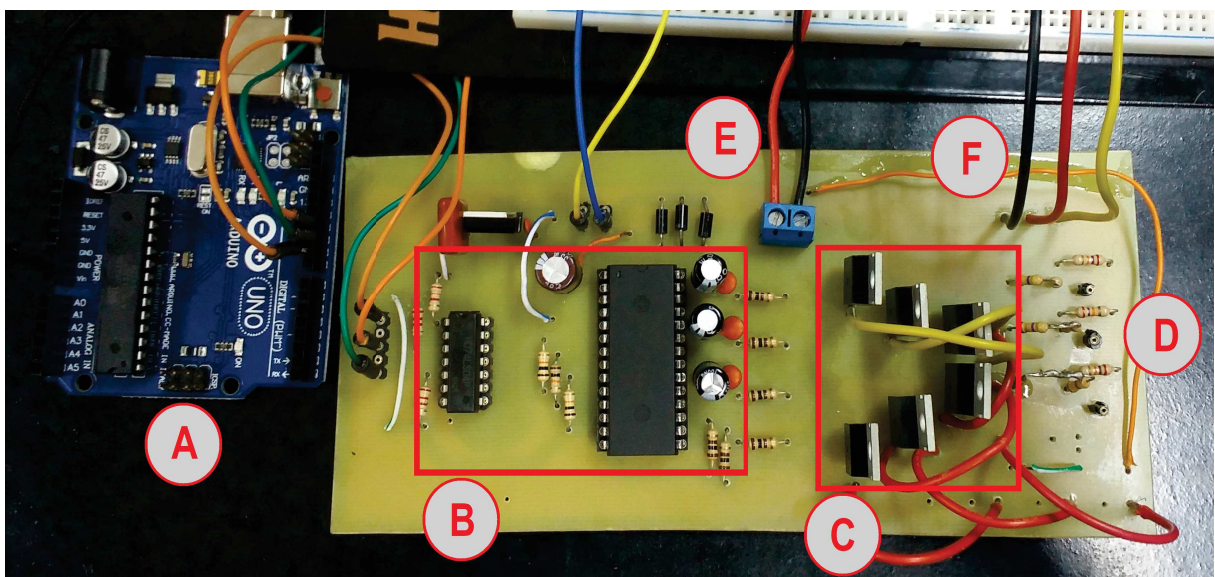
Figura 21 – Placa com circuito do módulo de potência: (A) Entrada da tensão CA; (B) Ponte retificadora; (C) Filtro capacitivo; (D) Saída da tensão CC.



Fonte: Autoria própria.

de $100\ \Omega$ em Y. Utilizando um osciloscópio da marca Keysight, modelo DSO1012A, obteve-se as formas de onda dos SPWMs e das tensões.

Figura 22 – Placa com circuito do módulo VSI trifásico: (A) Microcontrolador gerando SPWM; (B) Módulo de Controle; (C) MOSFETs; (D) Sensores de tensão; (E) Alimentação CC; (F) Saída das fases R,S e T.



Fonte: Autoria própria.

Após testes em carga e tensão de entrada reduzida, com um auxílio de reostato linear de $1\text{ k}\Omega$ e $1,25\text{ kW}$, mediu-se as formas de onda das tensões de fase para uma entrada de 180 V de máxima, com o reostato ajustado em $1\text{ k}\Omega$. Em seguida, ajustou-se o reostato para $161\ \Omega$ e alimentando novamente com 180 V de máxima, assim obtendo uma potência de 100 W .

A PCI foi desenvolvida em *software* computacional tendo como *layout* apresentado na Figura 33 (Apêndice B).

3.2.3 Medindo a defasagem

Para comprovação da defasagem dos sinais foi utilizado a variável tempo, visto que o osciloscópio não apresenta a defasagem em graus ($^\circ$). Com a Equação 1 foi possível determinar o período de uma onda com frequência de 60 Hz , resultando em $16,67\text{ ms}$.

Com o período na onda foi possível determinar a relação entre período e intervalo de condução, sendo descrito na Tabela 10 os valores obtidos.

Tabela 10 – Relação entre graus, período e frequência para medição da defasagem dos sinais.

INTERVALO DE CONDUÇÃO ($^\circ$)	PERÍODO (ms)
120	5,56
240	11,11
360	16,67

Fonte: Autoria própria.

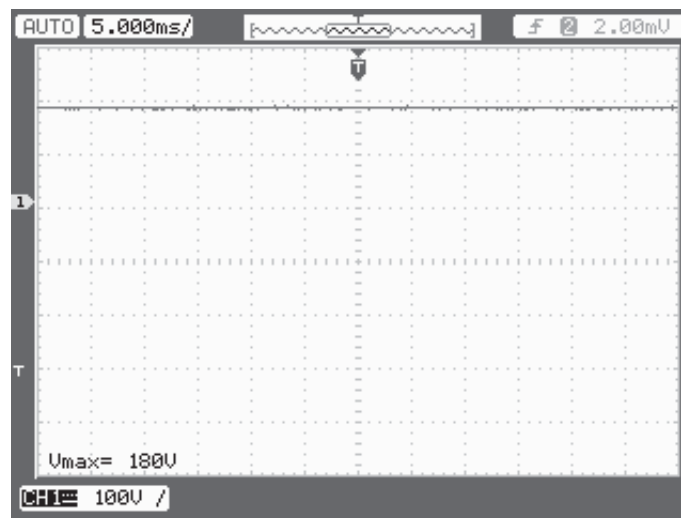
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do desenvolvimento e dos testes deste projeto. Primeiramente, são apresentados os resultados referentes à modulação SPWM, simulado e medido. Em seguida, são apresentados os resultados dos testes feitos na PCI do módulo de potência e na PCI do módulo VSI trifásico para uma tensão de 15 V, junto com sua simulação. E por fim, o teste feito para a tensão de 180 V. A Figura 22 apresenta a implementação do sistema completo proposto neste trabalho.

4.1 Resultado do módulo de potência

Alimentando o módulo de potência com a rede elétrica através do *variac* para uma tensão de 180 V, obteve-se o resultado apresentado pela Figura 23. O módulo demonstrou uma tensão CC em sua saída, com valor de aproximadamente 180 V de tensão máxima.

Figura 23 – Sinal de tensão da saída da ponte retificadora.



Fonte: Autoria própria.

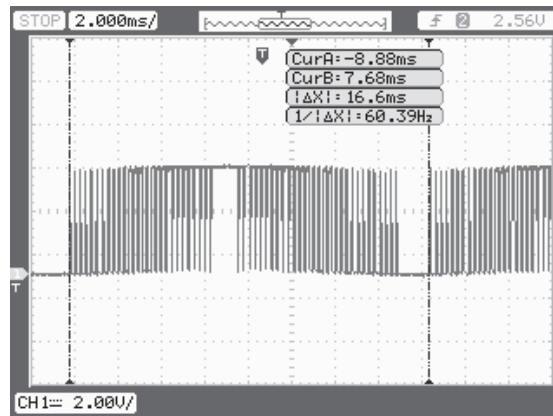
4.2 Resultados da implementação do SPWM

Na implementação do SPWM, foram testados três tópicos: o SPWM com frequência de 60 Hz; sinais complementares para MOSFETs do mesmo braço do inversor; e a defasagem entre os sinais de braços diferentes.

Inicialmente, testou-se se o sinal gerado pelo Arduino estaria com uma frequência de 60 Hz, medindo através do osciloscópio, obtendo a forma de onda apresentada na Figura 24.

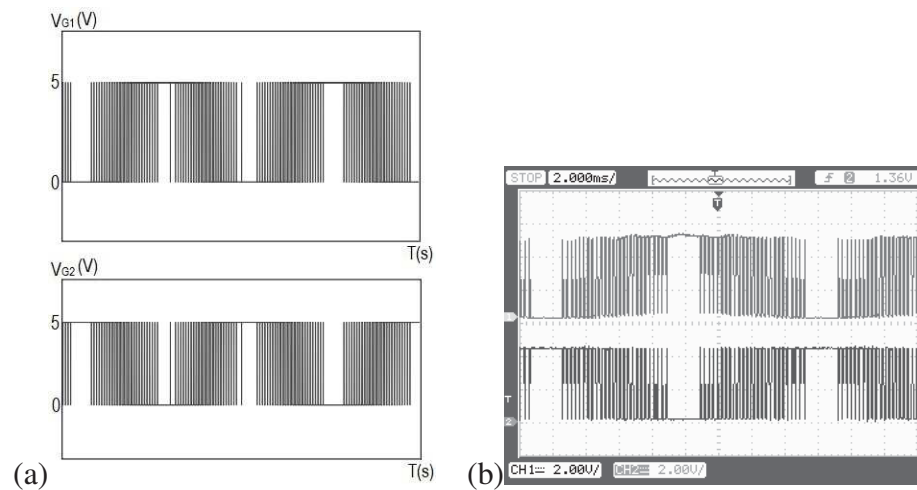
Posteriormente, efetuou-se o teste dos sinais complementares (simulado e prática) obtendo como resultado as formas de onda da Figura 25.

Figura 24 – Sinal do SPWM gerado pelo Arduino com frequência de 60 Hz.



Fonte: Autoria própria.

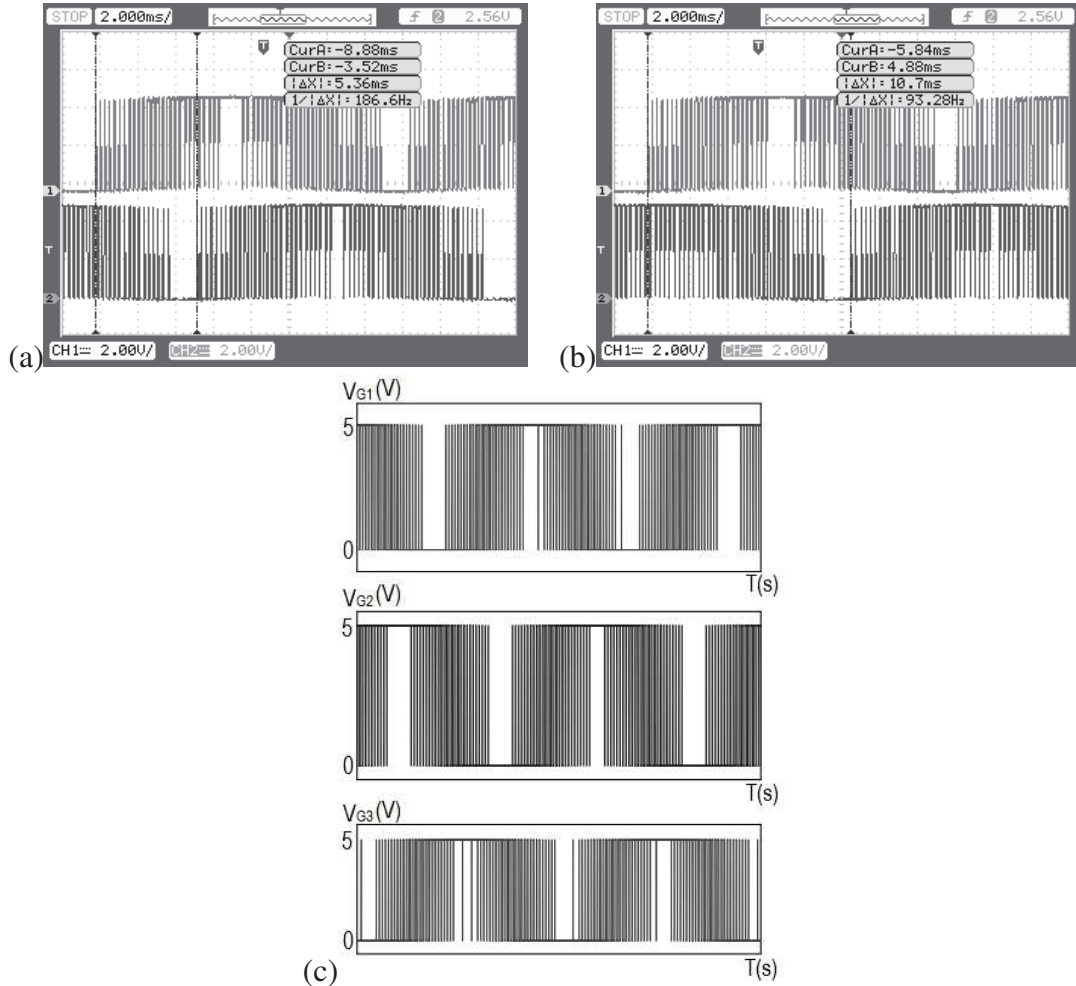
Figura 25 – Formas de onda dos sinais de SPWM complementares obtidos a partir da simulação e do Arduino: (a) SPWM para $gates G_1$ e G_2 simulados (b) SPWM para $gates G_1$ e G_2 do circuito prático.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência, efetuou-se o último teste para implementação do SPWM, que verificou a defasagem entre os sinais de braços diferentes, por meio de simulação e de medição através do osciloscópio, obtendo-se as formas de onda presentes na Figura 26. A Tabela 10 afirma a defasagem entre os sinais obtidos.

Figura 26 – Formas de onda dos sinais de SPWM defasados obtidos a partir da simulação e do circuito de acionamento: (a) SPWM para *gates* G_1 e G_2 do circuito prático (b) SPWM para *gates* G_1 e G_3 do circuito prático (c) SPWM para *gates* G_1 , G_2 e G_3 simulados.

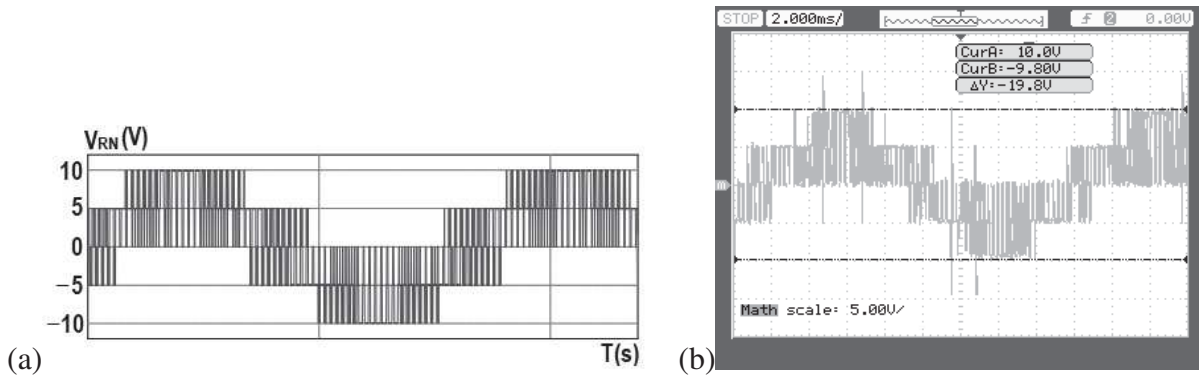


Fonte: Autoria própria.

4.3 Resultados da implementação do VSI trifásico

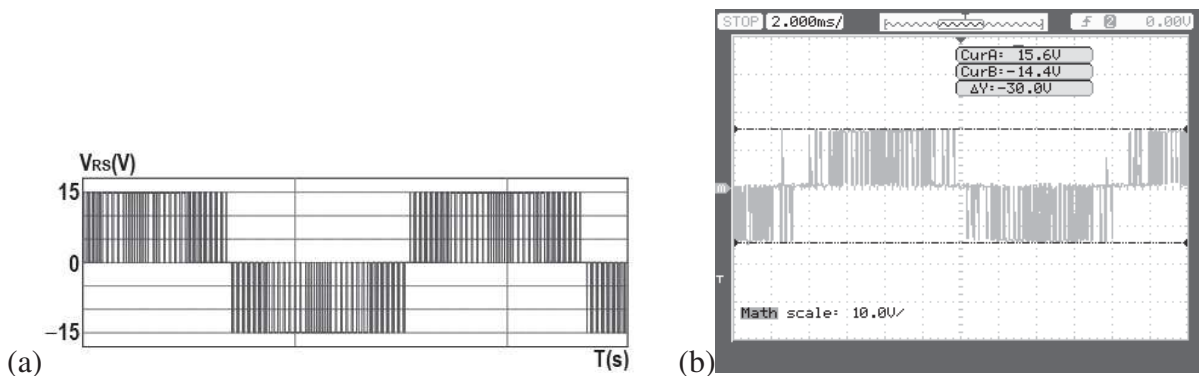
Com o circuito do módulo VSI triáfico montado na PCI, com as condições de alimentação citadas na subseção 3.2.2, obteve-se as formas de onda apresentadas na Figura 27 para as tensões de fase, apresentando as mesmas características das formas de onda da Figura 17. E, obteve-se as formas de onda das tensões de linha apresentadas na Figura 28.

Figura 27 – Formas de onda da tensão de fase V_{RN} do módulo VSI trifásico para uma carga em Y de $100\ \Omega$, com uma alimentação de 15 V, obtidos a partir da simulação e do circuito teste: (a) Tensão de fase obtida em simulação (b) Tensão da fase obtida através da função *MATH* do osciloscópio.



Fonte: Autoria própria.

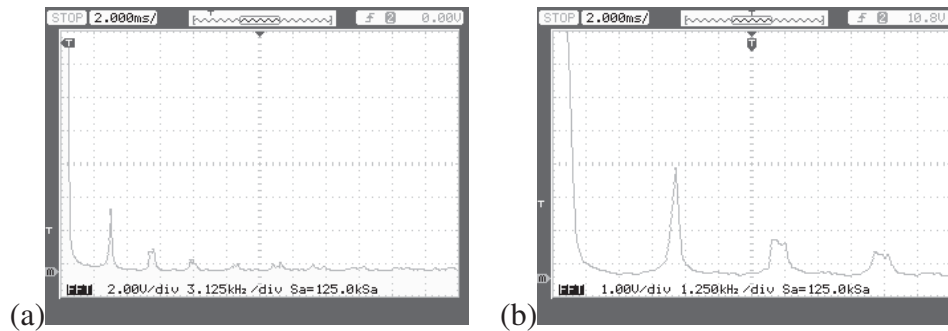
Figura 28 – Formas de onda da tensão de linha V_{RS} do módulo VSI trifásico para uma carga em Y de $100\ \Omega$, com uma alimentação de 15 V, obtidos a partir da simulação e do circuito teste: (a) Tensão de linha obtida em simulação (b) Tensão da linha obtido através da função *MATH* do osciloscópio.



Fonte: Autoria própria.

Para essas condições ainda, foi obtido a Transformada Rápida de Fourier (FFT), onde é possível observar a componente fundamental em 60 Hz e as harmônicas presentes a partir da frequência de 3,9 kHz.

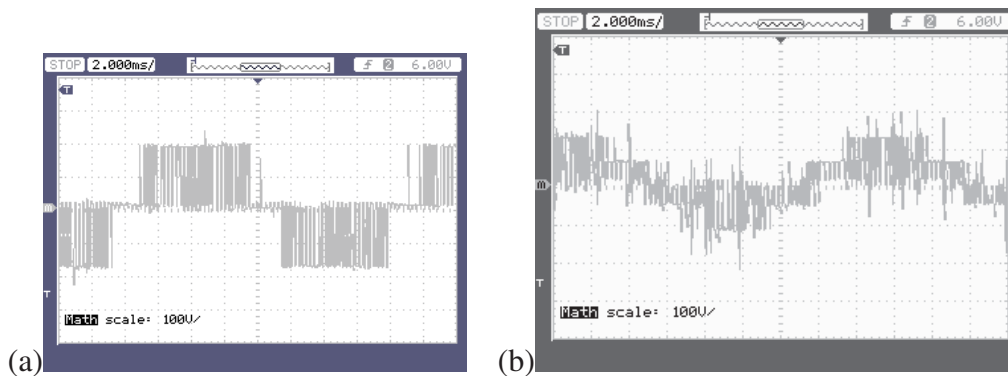
Figura 29 – FFT da fase V_R obtida com uma tensão de alimentação de 15 V: (a) FFT com 2,00 V/div e 3,125 kHz/div (b) FFT com 1,00 V/div e 1,250 kHz/div.



Fonte: Autoria própria.

Alterando a carga para o restato e executado os passos descritos em 3.2.2, obteve-se as formas de ondas da tensão de fase V_{RN} e tensão de linha V_{RS} apresentadas pela Figura 30.

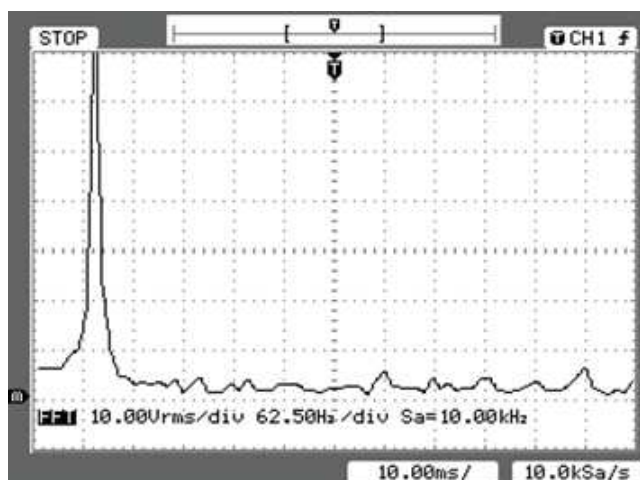
Figura 30 – Formas de onda das tensões de fase e linha do módulo VSI trifásico para uma carga em Y de 161Ω obtidos a partir do circuito teste: (a) Tensão da fase RN obtido através da função *MATH* do osciloscópio (b) Tensão da linha RS obtido através da função *MATH* do osciloscópio.



Fonte: Autoria própria.

Para essas condições também obteve-se a FFT, Figura 31, os valores das amplitudes das harmônicas são apresentados pela Tabela 11. Sobre esses resultados, calculou-se a THD do sinal com os valores de tensão através da Equação 23, obtendo uma THD de 8,62 % e calculado o FD, através da Equação 24, resultando num valor de 1,62 %.

Figura 31 – FFT da fase V_R obtida com uma tensão de alimentação de 180 V: FFT com 10,00 V/div e 62,50 Hz/div



Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – Medidas das amplitudes das harmônicas e da componente fundamental obtidos no teste para tensão de alimentação de 180 V e carga de 161 Ω .

SINAIS	AMPLITUDES (V)
Fundamental	126,4
3 ^a harmônica	4,00
5 ^a harmônica	5,92
7 ^a harmônica	6,24
9 ^a harmônica	3,20
11 ^a harmônica	2,72
13 ^a harmônica	1,28
15 ^a harmônica	5,04

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Um inversor foi projetado e implementado de forma modular, facilitando sua aplicação em sistemas diversos. Apesar das dificuldades encontradas por falta de equipamentos no laboratório ocasionando atrasos nas etapas de projeto, o desenvolvimento deste trabalho serviu para testar os conhecimentos adquiridos pelo autor durante o curso de graduação em engenharia eletrônica, enriquecendo ainda mais sua formação.

A pesquisa e desenvolvimento deste trabalho resultou na implementação de um sistema que atendeu ao objetivos propostos na seção 1, conforme resultados apresentados na seção 4, resultando em um inversor de fonte de tensão trifásico microcontrolado.

A modulação SPMW apresentou-se eficiente com relação ao níveis harmônicos, quando comparada a uma onda quadrada que apresenta uma THD de 50 % (BARBI, 2008), e implementação computacional simples, podendo operar em diferentes frequências de chaveamento.

A onda de saída apresentou uma THD de 8,62 %, para uma tensão de 180 V de entrada e um FD de 1,62 %. Essa porcentagem para a THD pode ter sido em decorrência de interferências externas ou da escolha da frequência da onda portadora. E a porcentagem do FD está bem próximo de 5 %, valor este admissível segundo estabelecido pela norma IEEE-519/2014.

5.1 Trabalhos Futuros

A partir do conteúdo apresentado por este trabalho, nota-se que ele pode ser complementado sendo utilizado como base para trabalhos futuros como por exemplo:

- aplicação de um filtro LC em sua saída para obtenção de uma senóide pura;
- realização do controle em malha fechada para regular a tensão de saída;
- análise para cargas puramente resistiva conectada em triângulo e para cargas indutivas;
- implementação de sistemas para proteção de sobrecorrente, sobretensão e temperatura.

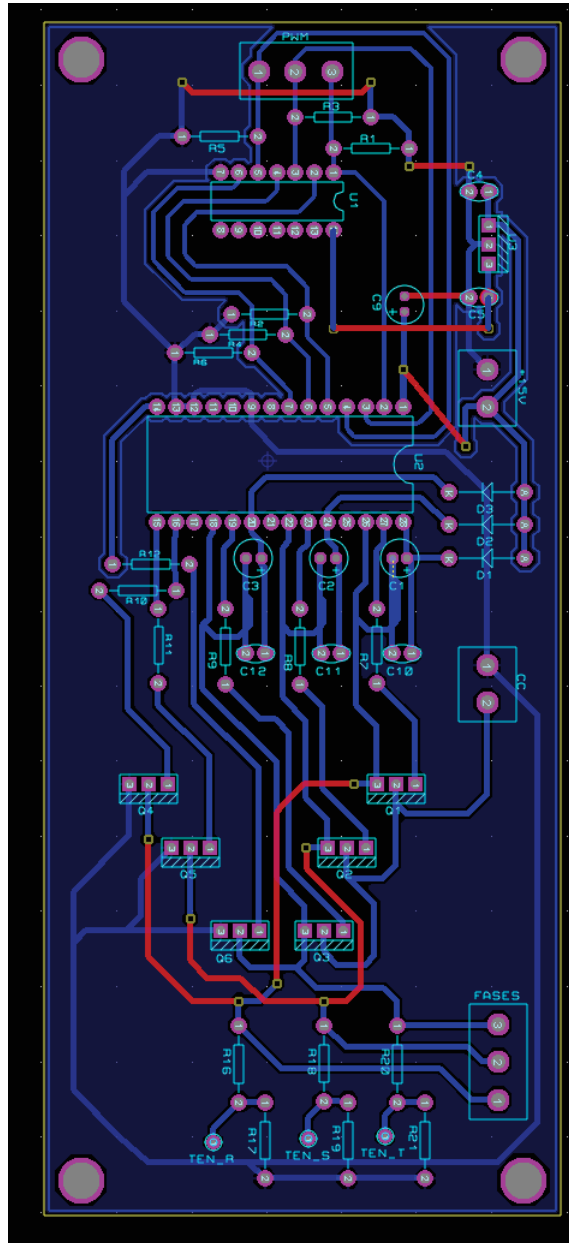
Referências

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. first. [S.l.]: Prentice Hall, 2000.
- ATMEL. **Microcontroller with 4/8/46/32KBytes In-System Programmable Flash**. [S.l.], 2010.
- BARBI, D. C. M. e I. **Eletrônica de potência: introdução ao estudo dos conversores CC-CA**. second. [S.l.]: Ed. dos Autores, 2008.
- CONTINENTAL DEVICE INDIA LIMITED. **General purpose silicon rectifier 6A10**. [S.l.], 2007.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2018 - Ano base 2017**. thirteenth. [S.l.]: Empresa de Pesquisa Energética EPE, 2018.
- FAIRCHILD. **Terminal 1A Positive Voltage Regulators**. [S.l.], 2005.
- INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **O que é geração distribuída**. 2014. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd>. Acesso em: 28 de março de 2019.
- INSTRUTHERM. **Manual de Instruções - Fonte de Alimentação Modelo FA-3030**. [S.l.], 2008.
- INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2018**. twenty-first. [S.l.]: Internacional Energy Agency IEA, OECD, 2018.
- INTERNACIONAL RECTIFIER. **IRF740A HEXFET Power MOSFET**. [S.l.], 2008.
- INTERNATIONAL RECTIFIER. **3-Phase Bridge Driver**. [S.l.], 2004.
- MOTOROLA. **HEX inverter low power schottky 74LS04**. [S.l.], 2005.
- MOUSER. **Mouser Electronics**. 2007. Disponível em: <<https://br.mouser.com/>>. Acesso em: 27 de novembro de 2019.
- NEOSOLAR. **Inversor Off Grid**. 2018. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/inversor/inversor-solar-off-grid-onda-senoidal-pura.html?dir=asc&order=price>>. Acesso em: 28 de março de 2019.
- NEOSOLAR. **Inversor On Grid - Grid Tie**. 2018. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/inversor/grid-tie.html?dir=desc&order=price>>. Acesso em: 28 de março de 2019.
- RAZAVI, B. **Fundamentos de Microeletrônica**. first. [S.l.]: Editora LTC, 2010.
- SOUZA, R. di. **Inversor Solar Fotovoltaico: O Que É, Como Funciona e Tipos**. 2017. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/inversor-fotovoltaico-o-que-e-como-funciona/>>. Acesso em: 28 de março de 2019.

Apêndices

APÊNDICE B – *Layout* da PCI do Módulo VSI Trifásico

Figura 33 – *Layout* da PCI do módulo VSI trifásico desenvolvido em *software* computacional.



Fonte: Autoria própria.