

**UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E AMBIENTAIS**

Edgar de Jesus Endo

**CONVERSOR ALIMENTADO COM TENSÃO MONOFÁSICA PARA
ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

**Sorocaba/SP
2021**

Edgar de Jesus Endo

**CONVERSOR ALIMENTADO COM TENSÃO MONOFÁSICA PARA
ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. José Martins de Oliveira Junior

**Sorocaba/SP
2021**

Ficha Catalográfica

E46c Endo, Edgar de Jesus
Conversor alimentado com tensão monofásica para acionamento de motor de indução trifásico / Edgar de Jesus Endo. – 2021.
91 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. José Martins de Oliveira Junior.
Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) – Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2021.

1. Simulação (computadores). 2. Energia elétrica. 3. Conversores de corrente elétrica. 4. Circuitos eletrônicos. I. Oliveira Junior, José Martins de, orient. II. Universidade de Sorocaba. III. Título.

Edgar de Jesus Endo

**CONVERSOR ALIMENTADO COM TENSÃO MONOFÁSICA PARA
ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Martins de Oliveira Junior
Presidente da Banca
Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. Norberto Aranha
Universidade de Sorocaba

Prof. Dr. José Luiz Antunes de Almeida
Faculdade de Tecnologia de Sorocaba

Dedico este trabalho a minha querida esposa Rosidalva. Sem ela por perto os resultados não seriam os mesmos. Desde que ela passou a fazer parte da minha vida que vivencio uma espiral construtiva. Esta é mais uma das muitas conquistas ao seu lado. Grato pela sua compreensão e presença.

AGRADECIMENTOS

As primeiras pessoas a quem gostaria de agradecer são aquelas a quem possa ter me esquecido de citar. Peço também desculpa. Foram tantas as pessoas que me ajudaram nessa etapa, que tenho a certeza de esquecer alguma.

Agradeço a Deus, pois sem a permissão dEle nada acontece e ao Senhor Jesus Cristo por ser minha companhia e me dar forças nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

A minha esposa Rosidalva Aparecida do Amaral Endo, que com paciência e muito amor suportou e me apoiou durante todo o mestrado.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Waldemar Bonventi Júnior e, posteriormente, ao professor Dr. José Martins de Oliveira Junior, pela valiosa orientação, paciência e incentivo durante a realização deste trabalho, expresso a minha grande admiração.

Aos professores: Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves, Prof. Dr. Norberto Aranha, Prof. Dr. Fábio Márcio Squina, Profa. Dra. Angela F. Jozala, Profa. Dra. Valquíria Miwa Hanai Yoshida, que durante esse período me passaram conhecimentos e auxiliaram-me nesta caminhada.

“As amizades multiplicam as alegrias e dividem os sofrimentos.”

“Todas as vitórias ocultam uma
abdicação.” (Simone de Beauvoir)

RESUMO

Este trabalho busca demonstrar em simulador, a funcionalidade de um sistema eletrônico, em que se possa converter a alimentação monofásica em trifásica, que possibilite o acionamento de Motores de Indução Trifásicos, utilizando conversores eletrônicos. A pesquisa bibliográfica sobre o tema permite levantar as metodologias mais recentes usadas para tratar o assunto objeto deste estudo, bem como avaliar suas aplicações, identificando as articulações e impactos entre tais conceitos. O projeto aqui desenvolvido se propõe-se a estudar métodos de aplicação para obtenção de alto fator de potência e baixo índice de distorção harmônica total. Foram realizadas simulações para se averiguar o funcionamento do sistema CA-CA, com aplicação das técnicas de controle de acionamento de um motor de indução trifásico, com vistas à melhoria da eficiência energética e a redução de custos. Pôde-se observar que a corrente de entrada se encontrava em fase com a tensão de entrada. Fez-se sua análise harmônica e comprovou-se que apresentava baixo conteúdo harmônico e um fator de potência praticamente unitário, de 0,947, satisfazendo às expectativas e alcançando o objetivo proposto neste trabalho. Todo o processo realizou-se através da simulação computacional, por meio do simulador PSIM.

Palavras-chave: Monofásico Trifásico. Fator de Potência. Índice de Distorção Harmônica.

ABSTRACT

This work seeks to demonstrate, in a simulator, the functionality of an electronic system, in which the single-phase power can be converted into three-phase, which enables the activation of three-phase Induction Motors, using electronic converters. The bibliographic research on the subject allows to survey the most recent methodologies used to treat the subject of the study, as well as to evaluate its applications, identifying as articulations and impacts between such concepts. The project developed here aims to study application methods to obtain a high power factor and a low total harmonic distortion index. Simulations were carried out to verify the operation of the CA-CA system, with the application of control techniques for the activation of a three-phase induction motor, with a view to improving efficiency and reducing costs. It was observed that the input current was in phase with the input voltage. Its harmonic analysis was carried out and it was proved that it had a low harmonic content and a practically unitary power factor of 0.947, satisfying expectations and reaching the objective proposed in this work. The entire process is carried out through computer simulation, using the PSIM simulator.

Keywords: Single-phase Three-phase. Power factor. Harmonic Distortion Index.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conversores estáticos monofásico para trifásico típicos: (a) retificador de entrada sem controle de corrente, (b) retificador com controle de corrente e sem neutro para carga, (c) retificador com controle de corrente e neutro na carga conectado ao ponto médio do barramento CC, (d) retificador com controle de corrente e inversor quatro braços para conexão de carga trifásica com neutro.	29
Figura 2- Conversor monofásico para trifásico:(a) sem controle de corrente drenada da rede, (b) com controle da corrente drenada da rede.	30
Figura 3 - Topologia de conversor monofásico para trifásico utilizado.....	31
Figura 4 - Conversores conectados em paralelo com a rede: (a) Topologia proposta por Machado, Buso e Pomílio (2004), (b) Topologia proposta por Scapini <i>et al.</i> (2014), (c) Topologia proposta por Santos <i>et al.</i> (2009), (d) Topologia proposta por Santos <i>et al.</i> (2012), (e) Topologia proposta por Santos <i>et al.</i> (2009).	32
Figura 5 - Retificadores monofásicos não-controlados, de onda-completa.....	33
Figura 6 - Formas de onda para retificador com carga resistiva	34
Figura 7 - Formas de onda para retificador monofásico não-controlado, onda completa, com carga capacitiva	35
Figura 8 - Formas de onda no lado CA para retificador monofásico, onda-completa, não-controlado, alimentando carga indutiva	35
Figura 9 - Pontes retificadoras monofásicas: a) Semicontrolada assimétrica;.....	36
Figura 10 - Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada assimétrica, com carga altamente indutiva.....	37
Figura 11 - Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada simétrica, com carga altamente indutiva. Funcionamento normal (superior) e efeito da supressão dos pulsos de comando (inferior).....	38
Figura 12 - Formas de onda para ponte totalmente controlada, monofásica, alimentando carga indutiva	39
Figura 13 - Inversor trifásico tipo fonte de tensão.....	40
Figura 14 - Inversor fonte de corrente MLP utilizando IGBT	41
Figura 15 - Diagramas de blocos.....	42
Figura 16 - Topologia convencional do conversor monofásico - trifásico.....	43
Figura 17 - Tensão e corrente de entrada.....	44
Figura 18 - Tensões de linha trifásicas equilibradas.....	44
Figura 19 - Correntes trifásicas equilibradas de cada fase, na saída do conversor.....	45
Figura 20 - Conversor monofásico - trifásico meia ponte sem controle ativo do formato da corrente de entrada	45
Figura 21 - Tensão e corrente de entrada.....	46
Figura 22 - Tensões de linha trifásicas equilibradas.....	46
Figura 23 - Correntes trifásicas equilibradas de cada fase, na saída do conversor.....	47
Figura 24 - Conversor monofásico - trifásico ponte completa sem controle ativo do formato da corrente de entrada.....	48
Figura 25 - Tensão e corrente de entrada.....	48

Figura 26 - Tensões trifásicas equilibradas de saída	49
Figura 27 - Correntes trifásicas equilibradas de cada fase, na saída do conversor.....	49
Figura 28 - Conversor monofásico - trifásico com grampeamento no ponto neutro.....	50
Figura 29 - Topologia convencional do conversor monofásico-trifásico, com o conversor boost	51
Figura 30 - Tensão e corrente de entrada, forma qualitativa	51
Figura 31 - Conversor monofásico - trifásico meia ponte com controle ativo do formato da corrente de entrada	53
Figura 32 - Topologia ponte completa com controle ativo de corrente de entrada.....	54
Figura 33 - Topologia proposta por Enjeti para o conversor monofásico-trifásico.....	55
Figura 34 - Tensões trifásicas equilibradas de linha.....	56
Figura 35 - Correntes trifásicas equilibradas de cada fase, na saída do conversor.....	56
Figura 36 - Topologia proposta por Douglas e Malengret para o conversor monofásico-trifásico	57
Figura 37 - Tensões trifásicas equilibradas de linha.....	58
Figura 38 - Correntes trifásicas equilibradas de cada fase, na saída do conversor.....	58
Figura 39 - Ambiente de trabalho do software PSIM.....	60
Figura 40 - Barra de Ferramentas	60
Figura 41 - Barra de Elementos	61
Figura 42 - Parâmetros do resistor	62
Figura 43 - Parâmetros da fonte de tensão CA.....	63
Figura 44 - Parâmetros do MOSFET	63
Figura 45 - Simulation Control.....	64
Figura 46 - Parâmetros do Simulation Control.....	64
Figura 47 - Run Simulation	65
Figura 48 - Variáveis disponíveis na simulação	65
Figura 49 - Properties	66
Figura 50 - Forma de onda do sinal de tensão.....	66
Figura 51 - Circuito completo do Conversor monofásico - trifásico.....	68
Figura 52 - Retificador Monofásico.....	69
Figura 53 - Tensão e corrente de entrada.....	70
Figura 54 - Fator de Potência.....	70
Figura 55 - Taxa de Distorção Harmônica.....	71
Figura 56 - Forma de onda no interruptor ativo Vt2 e no interruptor passivo VD1	71
Figura 57 - Tensão de saída do retificador monofásico	72
Figura 58 - Inversor Trifásico.....	73
Figura 59 - Sinais de saída do inversor	74
Figura 60 - Inversor trifásico	74
Figura 61 - Ramo A – T1 conduzindo	75
Figura 62 - Ramo A – T4 conduzindo	76
Figura 63 - Ramo B – T3 conduzindo	76
Figura 64 - Ramo B – T6 conduzindo	77
Figura 65 - Ramo C – T2 conduzindo	77
Figura 66 - Ramo C – T5 conduzindo	78
Figura 67 - T1, T6 e T5 conduzindo entre 0° e 60°	79
Figura 68 - T1, T6 e T2 conduzindo entre 60° e 120°.....	79
Figura 69 - T1, T2 e T3 conduzindo entre 120° e 180°	80
Figura 70 - T4, T3 e T2 conduzindo entre 180° e 240°	80

Figura 71 - Circuito equivalente e Cálculo na faixa de 0° e 60°	81
Figura 72 - Circuito equivalente e Cálculo na faixa de 60° e 120°	82
Figura 73 - Circuito equivalente e Cálculo na faixa de 120° e 180°	82
Figura 74 - Circuito equivalente e Cálculo na faixa de 180° e 240°	83
Figura 75 - Confeção de gráfico - 0° a 60°	84
Figura 76 - Confeção de gráfico - 60° a 120°	84
Figura 77 - Confeção de gráfico - 120° a 180°	85
Figura 78 - Confeção de gráfico - 180° a 240°	85
Figura 79 - Confeção do gráfico - completo	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Publicações Anuais	19
Tabela 2 - Média do Consumo e Unidades Consumidoras na zona rural em relação ao Contexto Geral	20
Tabela 3 - Distorção Harmônica Individual de Tensão (<1kV)	26
Tabela 4 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.....	28
Tabela 5 - Componentes da Barra de Elementos.....	61
Tabela 6 - Símbolos e funções da Barra de medição	67
Tabela 7 - Símbolos e funções da barra de ferramentas do Simview.....	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODISP	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MWh	Mega Watt-hora
$\cos\varphi$	Cosseno φ
P	Potência
V	Tensão
I	Corrente
R	Resistor
MOS	Metal Oxide Semiconductor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
VP	Tensão de Pico
T	Tiristor
D	Diodo
C	Capacitor
Li	Indutor
VSI	Voltage Source Inverter
CSI	Current Source Inverter
SCR	Silicon Controlled Rectifier
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulse-Width Modulation
MLP	Modulação por Largura de Pulso
MRT	Monofilar com Retorno pelo Terra
fp	Fator de Potência

P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
EA	Energia Ativa
ER	Energia Reativa
THD	Total Harmonic Distortion
DHT	Distorção Harmônica Total
Vh	Amplitude das componentes harmônicas individuais da tensão
h	Ordem das harmônicas
V1	Amplitude da componente fundamental da tensão
kV	Quilovolt
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
VTCD	Variações de tensão de curta duração
p.u	Sistema por unidade
Hz	Hertz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo geral	21
1.2	Objetivos específicos.....	21
2	O MÉTODO	22
3	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	24
3.1	Tensão em Regime Permanente.....	24
3.2	Fator de Potência	24
3.3	Distorções Harmônicas	25
3.4	Flutuação de Tensão.....	27
3.5	Variação de Tensão de Curta Duração	27
3.6	Variação de Frequência	28
4	CONVERSORES MONOFÁSICOS – TRIFÁSICOS	29
4.1	Conversor monofásico para trifásico	29
4.2	Conversor Monofásico-Trifásico	32
4.3	Retificador monofásico	33
4.4	Retificadores não controlados	33
4.5	Retificadores Controlados	36
4.5.1	Ponte semicontrolada assimétrica (Figura 9.a)	36
4.5.2	Ponte semicontrolada simétrica (Figura 9.b)	37
4.5.3	Ponte totalmente controlada (Figura 9.c)	38
4.6	Inversor trifásico	39
4.6.1	Inversor tipo fonte de tensão (VSI - Voltage Source Inverter)	39
4.6.2	Inversor tipo fonte de corrente.....	40
5	TOPOLOGIAS	42
5.1	Conversor sem controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor	42
5.1.1	Topologia Convencional	43
5.1.2	Topologia meia ponte sem controle ativo de corrente de entrada	45
5.1.3	Topologia ponte completa sem controle ativo de corrente de entrada	47

5.1.4	Topologia com grampeamento no ponto neutro.....	49
5.2	Conversor com controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor.....	50
5.2.1	Topologia Convencional com o conversor Boost.....	51
5.2.2	Topologia meia ponte com controle ativo de corrente de entrada	52
5.2.3	Topologia ponte completa com controle ativo de corrente de entrada	53
5.2.4	Topologia de Enjeti	54
5.2.5	Topologia de Douglas e Malengret	56
6	PSIM – SOFTWARE SIMULADOR DE CIRCUITOS PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E APLICAÇÕES EM ENERGIA ELÉTRICA	59
6.1	Descrição Geral	59
6.2	Ambiente de Trabalho e Barra de Menu	59
6.3	Barra de Ferramentas.....	60
6.4	Barra de Elementos	61
7	SIMULAÇÃO.....	62
7.1	Montagem do Circuito.....	62
7.1.1	Alterações de parâmetros dos componentes	62
7.2	SIMVIEW	65
8	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	68
8.1	Simulação do Retificador Monofásico.....	69
8.2	Simulação do Inversor Trifásico.....	73
8.3	Formação da Onda Senoidal Modificada.....	74
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

É inimaginável uma vida na sociedade moderna sem o uso intensivo de uma ou mais formas de energia.

Dentre as diversas formas de energias existentes processadas e colocadas à disposição dos consumidores se destacam a eletricidade, a gasolina, o álcool, óleo diesel, gás natural, entre outros.

A energia é usada desde os dispositivos mais simples como lâmpadas e motores elétricos até os mais complexos como geladeira, automóvel ou uma fábrica.

Dentro desse cenário, a eletrônica de potência permite a utilização da energia proveniente das fontes geradoras convencionais já existentes, tais como usinas hidroelétricas e térmicas, além de facilitar o aproveitamento de novas fontes de energia, de acordo com Carrasco *et al.* (2006).

Um dos principais motivos da utilização de conversores de monofásico para trifásico são:

- ✓ Motores trifásicos são mais eficientes e econômicos;
- ✓ Motores trifásicos apresentam menores correntes de partida e regime de trabalho.

Os conversores estáticos baseados em semicondutores para conversão direta de monofásico para trifásico são os mais eficientes, de menor custo e de simples implantação (ENJETI; RAHMAN; JAKKLI, 1993).

Os itens importantes considerados neste trabalho são:

- ✓ Simplificação do circuito visando economia reduzindo componentes e com isso tornar o equipamento mais barato e menor;
- ✓ Utilizar controladores simples;
- ✓ Obter alto fator de potência;
- ✓ Obter baixo índice de distorção harmônica total.

Estima-se que é possível economizar 20% da demanda de energia global com o aumento da eficiência permitida pela eletrônica de potência aliada a outras tecnologias existentes (BOSE, 2020).

As redes monofásicas atendem perfeitamente bem as necessidades demandadas pelos usuários residenciais, que são os afazeres diários domésticos como ligar televisão, geladeira, computador, rádio, chuveiro, máquina de lavar,

iluminação etc. Porém quando se fala em usuários produtivos ¹, as redes monofásicas deixam a desejar. Os usuários produtivos necessitam de equipamentos elétricos mais potentes, o que limita a utilização dos motores monofásicos, devido à potência limitada e baixo conjugado de partida. Assim, a solução para esses usuários passa a ser a conversão do sistema monofásico para trifásico, através da utilização de conversores.

A maioria das redes rurais são monofásicas e, devido à característica de utilização da rede pelos usuários da zona rural, têm-se grandes variações de cargas ao longo do dia. As partidas diretas de motores monofásicos de potências consideráveis e curtos-circuitos momentâneos dentro da rede de distribuição causam afundamentos de tensão (redução momentânea do valor eficaz).

Os principais problemas de qualidade de energia nas redes elétricas rurais e urbanas são significativos afundamentos de tensão, afundamentos de tensão momentâneos, sobretensão na rede, harmônicos de tensão, além dos problemas de baixo fator de potência e não linearidade das cargas conectadas à rede (BOLLEN, 2000).

Assim, esses problemas, contribuem para prejudicar a qualidade da energia nas propriedades rurais.

Este tema tem sido amplamente discutido nos últimos anos como pode-se observar na tabela 1. O número de publicações por ano sobre o tema Three-phase Converters.

Tabela 1 - Publicações Anuais

Ano	Nº de Publicações
2019	4.479
2018	4.029
2017	3.804
2016	3.469
2015	3.176
2014	2.866
2013	2.765

Fonte: Science Direct – Acessado em 02/01/2020

¹ que utilizam a energia elétrica para produção em escala com vistas a obtenção de lucro

Segundo dados extraídos dos relatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (PRODISP, 2018), pode-se verificar o consumo de energia elétrica em MWh e comparar com os dados gerais de consumo. Como referência os anos compreendidos entre 2013 a 2019, conforme se segue:

Tabela 2 - Média do Consumo e Unidades Consumidoras na zona rural em relação ao Contexto Geral

Ano	Consumo de Energia Elétrica na zona rural MWh	Número de Unidades Consumidoras na zona rural	Consumo de Energia Elétrica em relação ao contexto Geral	Unidades Consumidoras em relação ao contexto Geral
2013	21.772.504,45	52.106.792	6,61%	5,91%
2014	23.194.291,54	52.962.393	6,72%	5,82%
2015	23.219.246,41	54.039.508	6,79%	5,76%
2016	23.853.281,60	54.942.041	7,23%	5,74%
2017	24.497.199,82	55.687.473	7,81%	5,69%
2018	24.901.428,91	56.319.192	7,97%	5,65%
2019	20.819.092,12	47.437.227	7,96%	5,63%

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

Analisando os dados da tabela 2, pode-se verificar que a média de consumo de Energia Elétrica na Zona Rural entre os anos de 2013 a 2019 é de 7,3% em relação ao total global utilizado nesta mesma época no Brasil todo. Neste mesmo período, a média de Unidades Consumidoras em relação ao total global é de 5,74%.

Esses números motivaram a realização do tema deste trabalho, pois é possível constatar uma enorme possibilidade de crescimento nesse segmento, comparando consumo de energia elétrica e unidades consumidoras com o consumo geral do Brasil, sendo assim, com a necessidade cada vez maior de utilização de motores maiores nas produções rurais frente a não disponibilidade de rede trifásica para o acionamento desses motores, se torna interessante a utilização de um conversor de energia monofásica em energia trifásica proposto neste trabalho.

Para solucionar ou mesmo minimizar os problemas de qualidade de energia de redes elétricas monofásicas rurais, assim como fornecer tensão trifásica regulada, este trabalho propõe a integração de um conversor monofásico para trifásico que

contém uma ponte retificadora monofásica semicontrolada simétrica e uma unidade inversora trifásica tipo Fonte de Tensão que utilizam seis interruptores ativos em suas construções. O conversor proposto será um projeto robusto, funcional e simples e, fornecerá para a carga uma tensão trifásica para o funcionamento de um motor de indução do tipo trifásico onde não haja a rede trifásica.

É válido destacar que a escolha do uso de computadores (simulação computacional) para a realização deste o projeto ocorre em virtude dos avanços da tecnologia nos últimos anos e dos excelentes resultados obtidos por meio dela.

1.1 Objetivo geral

Projetar e avaliar um conversor monofásico-trifásico com as características de simplicidade e robustez, através da simulação computacional.

1.2 Objetivos específicos

- ✓ Analisar o desempenho de sistemas – analisar os ramos dos conversores (retificador senoidal, inversor e controle de chaveamento)
- ✓ mostrar as vantagens para a utilização de cada ramo.
- ✓ Estudar/Analisar a viabilidade de um projeto de conversor confiável, simples e funcional.
- ✓ Verificar o comportamento do conversor que utiliza como estrutura uma ponte retificadora monofásica semicontrolada simétrica e uma unidade inversora trifásica tipo fonte de tensão, através de simulações, usando a plataforma Power Electronics Simulation (PSIM), analisando principalmente o fator de potência, distorção harmônica, as correntes de entrada e saída.

2 O MÉTODO

Trata-se de um estudo que tem como objetivo geral, projetar e avaliar um conversor monofásico-trifásico com características de simplicidade e robustez, através da simulação computacional, analisando principalmente o fator de potência, distorção harmônica e as correntes de entrada e saída.

Passou-se então para a definição de qual programa de simulação se encaixaria melhor aos objetivos do trabalho, e durante o curso foram testados os programas Proteus, CadSimu, Matlab e o Psim.

Os seguintes critérios foram utilizados para a definição da escolha de qual programa seria utilizado para a realização deste estudo: a) ser um software que possibilite facilidade de operação na montagem dos circuitos, b) entregar em sua saída as simulações e resultados similares aos resultados desenvolvidos em laboratório, usando-se os componentes e instrumentos físicos e c) ter um bom custo-benefício, ou seja, que não seja dispendioso.

Os testes se iniciaram com o software Proteus e verificou-se que é uma ferramenta muito utilizada por professores e alunos, para simular e criar circuitos, porém, constatou-se que é uma ferramenta mais específica para microcontroladores e aplicações analógicas e digitais, para os demais itens o programa cumpre os critérios estabelecidos. Passou-se a testar o software CadSimu e verificou-se que é uma ferramenta direcionada e específica para comandos elétricos, CLP (controlador lógico programável) e pneumática, como a partida direta de motores e partidas de motores com auxiliares como soft starter e inversores de frequência, destoando do objetivo proposto no trabalho, para os demais itens o programa cumpre os critérios estabelecidos. Por fim, testou-se o programa PSIM que mostrou-se ser um software de simulação ideal para conversores e condicionadores de energia, acionamentos de máquinas elétricas, sistemas de energias renováveis e muitas outras aplicações em eletrônica de potência, demonstrando-se ideal para o que foi proposto no trabalho, também demonstrou ser de fácil manipulação para a montagem dos circuitos e simulações, além de ser um software que pode ser baixado na versão demonstração, no site do desenvolvedor.

Optou-se então pelo PSIM, para o qual fazemos uma descrição detalhada das suas características, no capítulo 6 deste trabalho.

O estudo foi desenvolvido em três etapas: a) montagem do conversor monofásico-trifásico; b) simulação do conversor monofásico-trifásico e c) análise do fator de potência, distorção harmônica e das correntes de entrada e saída.

Para a realização da primeira etapa e melhor entendimento na etapa seguinte, realizou-se a montagem do conversor monofásico-trifásico em duas partes: a) retificador monofásico e b) inversor trifásico.

Na segunda etapa realizou-se a simulação no retificador monofásico e no inversor trifásico separadamente. Nesta etapa, procurou-se monitorar a entrada e saída dos sinais de cada parte.

Na terceira etapa procurou-se atentar para os resultados que o simulador retornou do fator de potência, distorção harmônica e das correntes de entrada e saída.

Os resultados desses dados foram disponibilizados pelo simulador PSIM, os quais foram verificados e analisados.

3 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados à qualidade da energia elétrica, extraídos do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Em se falando de redes monofásicas rurais, deve-se ater com a qualidade de energia e, os indicativos mais relevantes: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, flutuação de tensão, variação de tensão de curta duração e a variação de frequência.

3.1 Tensão em Regime Permanente

O programa PRODIST estabelece limites para os valores de tensão em regime permanente, esses valores de tensões de referência e os valores limites são divididos em adequados, precários e críticos. Esse procedimento, estabelece os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão, métodos de medição, métodos de registros e prazos para compensação ao consumidor em caso de não-conformidade de tensão (PRODISP, 2018).

Os valores de tensão em regime permanente, obtidos por medições segundo métodos descritos pelos procedimentos, devem ser comparados aos valores de tensões de referência. A tensão de referência deve ser a tensão eficaz nominal ou a contratada.

3.2 Fator de Potência

O fator de potência é diretamente proporcional a $\cos\phi$, é um parâmetro que sinaliza como está o aproveitamento da energia elétrica pelo consumidor. Seu valor pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor está o aproveitamento. Esse parâmetro depende do tipo de carga que predomina na rede: resistiva ou indutiva. Para carga resistiva, o ângulo ϕ é igual a 0° (PRODISP, 2018).

Fundamentalmente, as aplicabilidades dos sistemas elétricos são basicamente indicadas por potência aparente, potência ativa. Segundo Lowenstein (2003) o fator de potência é o único valor que representa a medida em que a distribuição de energia elétrica está sendo eficiente e eficazmente utilizada. Para Emadi (2004) um fator de potência baixo prejudica a eficiência do sistema, enquanto que e o fator de potência

alto traz benefícios com a diminuição das perdas em condutores de distribuição, transformadores e outros equipamentos, ocasionando em benefício econômico no consumo de energia e beneficia também na estabilização da tensão do sistema. Um fator de potência alto reduz a carga em transformadores e equipamentos de distribuição (PRODISP, 2018).

Conforme orientação o PRODISP, o valor do fator de potência deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q) através da equação 2.1 ou das respectivas energias (EA, ER) através da equação 2.2, como se segue:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (2.1)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2+ER^2}} \quad (2.2)$$

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente (PRODISP, 2018).

3.3 Distorções Harmônicas

A distorção harmônica de tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância série (linear) do sistema elétrico. Para cada frequência harmônica, há uma queda de tensão de mesma frequência, resultando, desta forma, na distorção da tensão na barra. (PAULILO; TEIXEIRA, 2013). É uma corrente elétrica que tem uma frequência que é múltipla da frequência original da rede (60 Hertz, chamada de frequência fundamental) e surgem nas instalações elétricas devido à presença de cargas não lineares.

O THD do inglês Total Harmonic Distortion ou Distorção Harmônica Total (DHT) da tensão é calculado pela equação (2.3), utilizando-se de valores medidos conforme procedimento descrito no Módulo 8 do PRODIST (PRODISP, 2018).

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Onde:

V_h = Amplitude das componentes harmônicas individuais da tensão;

h = Ordem das harmônicas;

V_1 = Amplitude da componente fundamental da tensão.

O valor de referência para a taxa de distorção harmônica total da tensão é $DHTV \leq 10\%$, porcentagem em relação da tensão fundamental, para tensão nominal menor que 1kV, ou seja, não ultrapassa o valor de 10% em relação a tensão fundamental. A Tabela 3 apresenta os valores de referência das distorções harmônicas individuais de tensão:

Tabela 3 - Distorção Harmônica Individual de Tensão (<1kV)

Ordem da Harmônica	N.º da Harmônica	Distorção
Pares	2	2,5
	4	1,5
	6	1
	8	1
	10	1
	12	1
	>12	1
	Ímpares - múltiplo de 3	3
9		2
15		1
21		1
>21		1
Ímpares - não múltiplo		5
	7	6,5
	11	4,5
	13	4
	17	2,5
	19	2
	23	2
	25	2
	>25	1,5

Uma das principais causas da distorção da forma de onda, é o uso de cargas não lineares, tais como retificadores e cicloconversores, pois geram níveis elevados de harmônicos de correntes e que ao interagirem com a impedância da linha, provocam distorção na tensão de alimentação no ponto de acoplamento comum (PAC). Outro mal relacionado ao uso de conversores estáticos é o notching, que são deformações na tensão da rede, causadas pela comutação de tiristores em retificadores trifásicos (SILVA, 2001).

3.4 Flutuação de Tensão

Flutuações de tensão são mudanças sustentadas na amplitude da tensão fundamental. Em muitos casos, são provocadas por variações em cargas específicas como: bombas, elevadores, compressores e fornos a arco. Podem ser também causadas por ajustes inadequados em reguladores de tensão, que realimentam pequenas variações positivamente (DECKMANN; POMÍLIO, 2017). A cintilação luminosa (flicker) é resultante das flutuações na amplitude da tensão de alimentação e provocam fadiga física e psíquica nos usuários deste sistema. Este fenômeno pode ser constatado visualmente sendo limitado pela norma IEC 61000-3-3 (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2016).

3.5 Variação de Tensão de Curta Duração

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos (PRODISP, 2018).

As variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 4:

Tabela 4 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea da tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 0,1 p.u
Variação Temporária da tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 p.u e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 0,1 p.u

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

Essas variações de tensão de curta duração, também são chamadas de *sag* e *swell*. O *sag* é caracterizado por uma queda no valor eficaz da tensão e o *swell* por uma elevação no valor eficaz da tensão (SILVA, 2001). Podem ocorrer de maneira momentânea ou temporária, dependendo do tempo de duração do distúrbio.

3.6 Variação de Frequência

O PRODIST define que a frequência, em condições normais e em regime permanente, deve operar dentro do limite de 59,9Hz a 60,1Hz. As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição, devem retornar para a faixa entre 59,5Hz e 60,5Hz em até 30 segundos após saírem dessa faixa, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, não podendo exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas, podendo permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e podendo permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

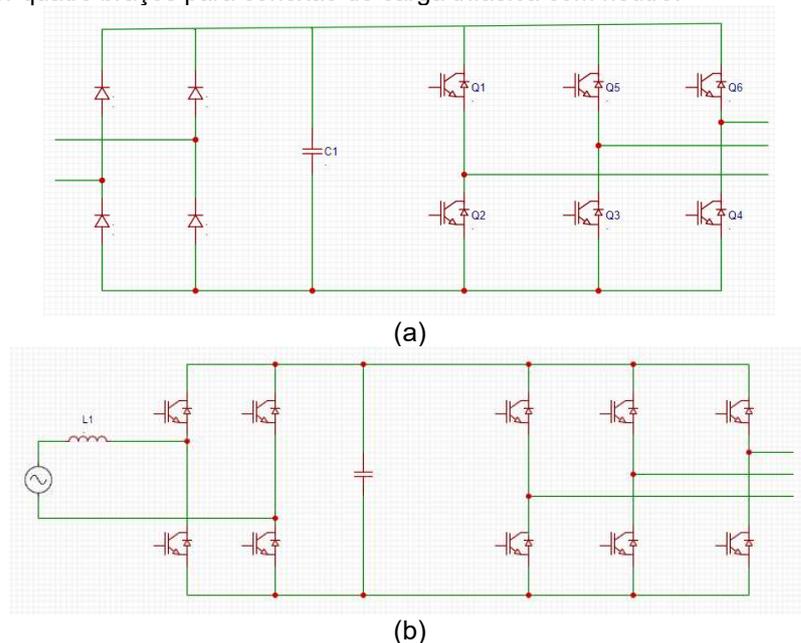
4 CONVERSORES MONOFÁSICOS – TRIFÁSICOS

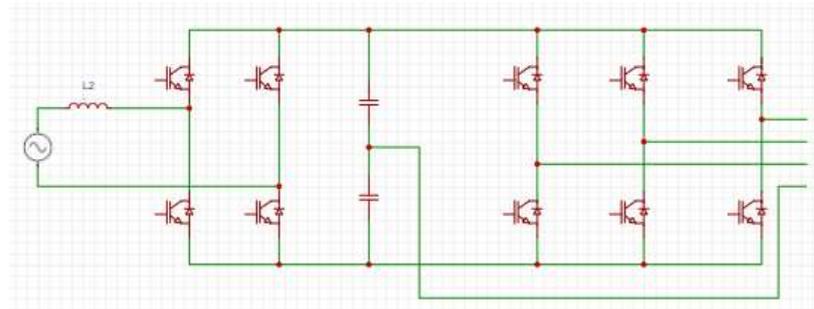
Os circuitos de distribuição elétrica monofásicos têm sido aplicados à eletrificação rural e serão usados no Brasil ainda por muito tempo. Essas redes monofásicas atendem adequadamente aos usuários residenciais, porém não atendem adequadamente aos usuários produtivos, setor que se observa em contínuo crescimento (BERTOLLO, 2008). Esses usuários produtivos demandam cada vez mais equipamentos elétricos de potência elevadas, o que limita a utilização dos motores monofásicos, devido à potência limitada e baixo conjugado de partida (MIRANDA, 2007). Assim, a solução para esses usuários passa a ser a conversão do sistema monofásico para trifásico na propriedade rural, através da utilização de conversores estáticos.

4.1 Conversor monofásico para trifásico

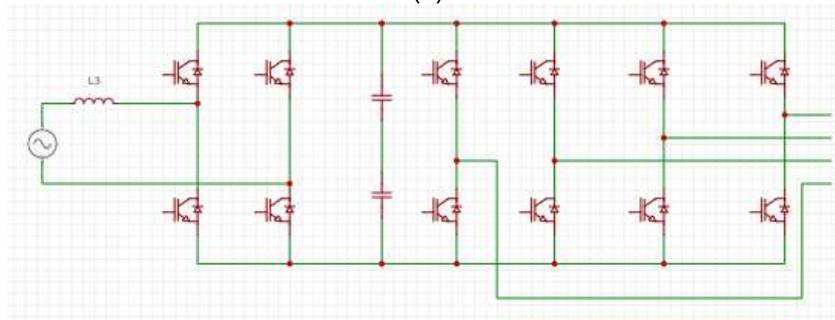
Justamente com o propósito de suprir a ausência (em sua maioria) de redes trifásicas, principalmente nas zonas rurais, onde a predominância são as redes monofásicas, foram criados os conversores estáticos monofásicos para trifásicos (SANTOS *et al.*, 2012) conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Conversores estáticos monofásico para trifásico típicos: (a) retificador de entrada sem controle de corrente, (b) retificador com controle de corrente e sem neutro para carga, (c) retificador com controle de corrente e neutro na carga conectado ao ponto médio do barramento CC, (d) retificador com controle de corrente e inversor quatro braços para conexão de carga trifásica com neutro.





(c)

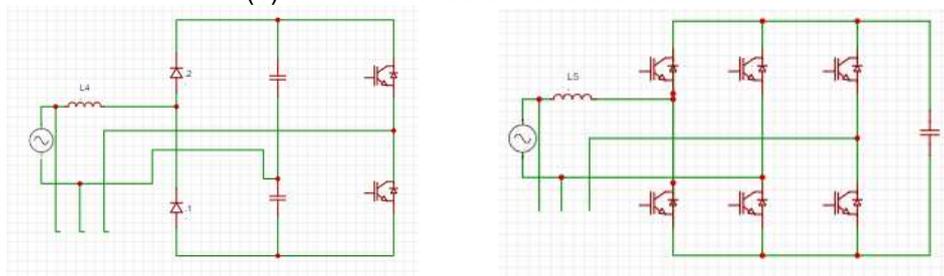


(d)

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2012).

A partir disso, novas topologias foram surgindo, agora com o intuito de simplificar o circuito e ao mesmo tempo reduzir o custo com componentes empregados (uma vez que na época eram muito caros). Na Figura 2 duas topologias com redução na quantidade de chaves empregadas no conversor. Na Figura 2(a) a topologia sem controle da corrente drenada da rede elétrica e na Figura 2(b) a topologia com controle a forma de onda da corrente drenada da rede elétrica (ENJETI; RAHMAN; JAKKLI, 1991, 1993; ENJETI; CHOUDHURY, 1992; ENJETI; RAHMAN, 1993).

Figura 2- Conversor monofásico para trifásico:(a) sem controle de corrente drenada da rede, (b) com controle da corrente drenada da rede.



(a)

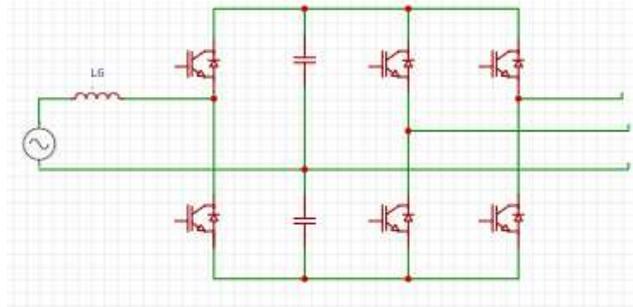
(b)

Fonte: Adaptado de (ENJETI, RAHMAN; JAKKLI, 1991).

Após a primeira onda que era suprir a ausência das redes trifásicas, a segunda onda que foi simplificar os circuitos e os custos, surgiu a terceira que passou a

despertar o interesse em se obter o controle da corrente senoidal drenada da rede elétrica. Na Figura 3 temos os trabalhos de Covic, Peters e Boys (1995), Douglas e Malengret (1998), Larsen *et al.* (1998) e Tshivhilinge e Malengret (1998) que buscam esse controle da corrente senoidal drenada da rede elétrica.

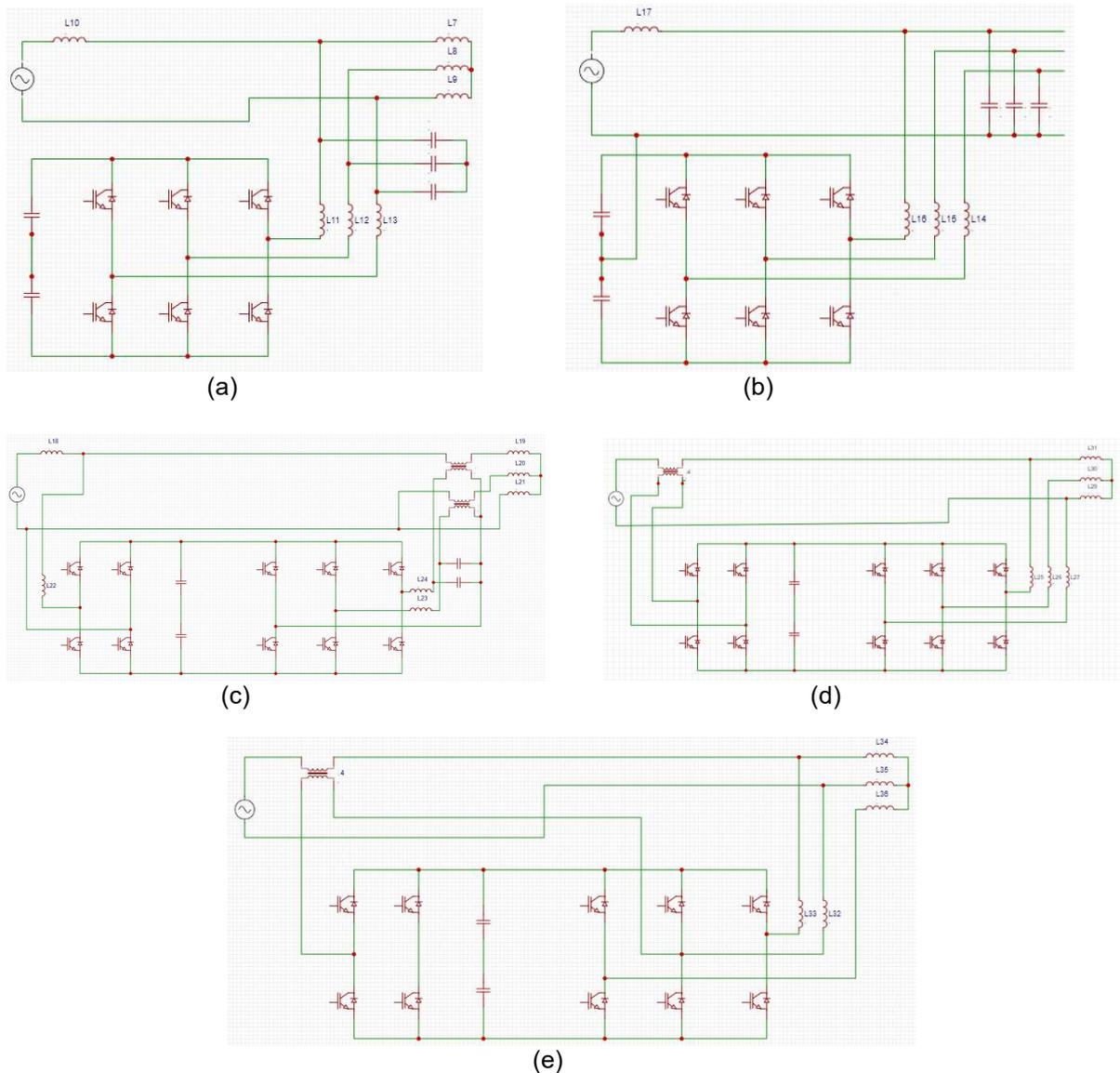
Figura 3 - Topologia de conversor monofásico para trifásico utilizado



Fonte: Adaptado de Covic, Peters e Boys (1995), Douglas e Malengret (1998), Larsen *et al.* (1998) e Tshivhilinge e Malengret (1998).

Atualmente, os preços dos componentes diminuiram significativamente, deixando de ser um problema na configuração dos conversores e novas topologias foram surgindo, como pode-se observar nos circuitos da Figura 4. Sem o limitante de preço, novas características foram priorizadas como confiabilidade, eficiência e menores taxas de distorções harmônicas. (SANTOS *et al.*, 2012). Nessa nova linha, considerando maior número de chaves, vários trabalhos foram publicados e surgiram também montagens onde se conectava o conversor em paralelo com a rede monofásica (MACHADO; BUSO; POMÍLIO, 2004; SANTOS *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2012; SCAPINI *et al.*, 2014). O conversor estando em paralelo com a rede monofásica irá fornecer apenas parte da potência à carga trifásica, isso irá contribuir para que o conversor reduza as perdas no retificador e melhore a sua eficiência (SCAPINI *et al.*, 2014). A Figura 4 mostra as topologias propostas para a conexão do conversor em paralelo com a rede monofásica.

Figura 4 - Conversores conectados em paralelo com a rede: (a) Topologia proposta por Machado, Buso e Pomílio (2004), (b) Topologia proposta por Scapini *et al.* (2014), (c) Topologia proposta por Santos *et al.* (2009), (d) Topologia proposta por Santos *et al.* (2012), (e) Topologia proposta por Santos *et al.* (2009).



Fonte: Adaptado de Conversores conectados em paralelo com a rede: (a) Topologia proposta por Machado, Buso e Pomílio (2004), (b) Topologia proposta por Scapini *et al.* (2014), (c) Topologia proposta por Santos *et al.* (2009), (d) Topologia proposta por Santos *et al.* (2012), (e) Topologia proposta por Santos *et al.* (2009).

4.2 Conversor Monofásico-Trifásico

Existe uma divisão entre os diversos tipos de retificadores conforme uma avaliação qualitativa de suas características, dividindo-os entre conversores que podem ou não controlar corrente de entrada (com correção do fator de potência) e

entre os que podem ou não ter fluxo de energia bidirecional (regenerativos). Com o intuito de aproveitar ao máximo a energia provinda da rede e minimizar o desgaste da mesma, é natural que seja feita a escolha de um conversor que se encaixe na classificação de regenerativo e com correção de fator de potência.

Em geral os conversores desse tipo são divididos em 2 módulos: um retificador monofásico e um inversor trifásico.

4.3 Retificador monofásico

O conversor eletrônico de energia monofásica para a energia trifásica, necessariamente em sua estrutura, utilizará um retificador e um inversor.

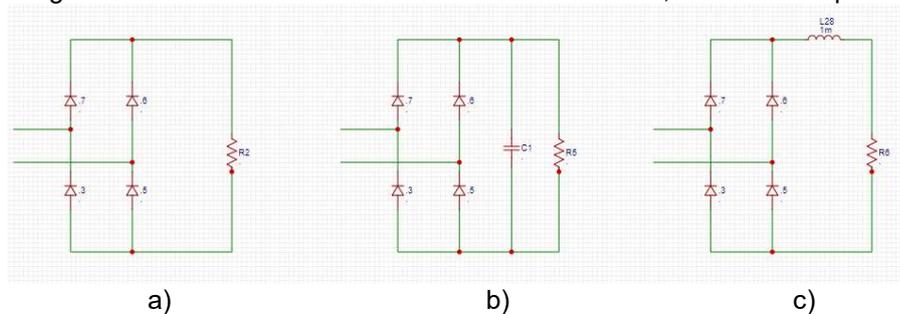
Na aplicação, o fornecimento da energia elétrica será monofásica alternada que resultará em tensão contínua. A conversão CA-CC é realizada por conversores chamados retificadores.

Classificam-se em retificadores controlados e não controlados dependendo de sua capacidade de controlar a tensão de saída, isso muito em função de sua estrutura na combinação dos seus elementos em sendo meia ponte ou ponte completa. A seguir são apresentados os retificadores não controlados e retificadores controlados.

4.4 Retificadores não controlados

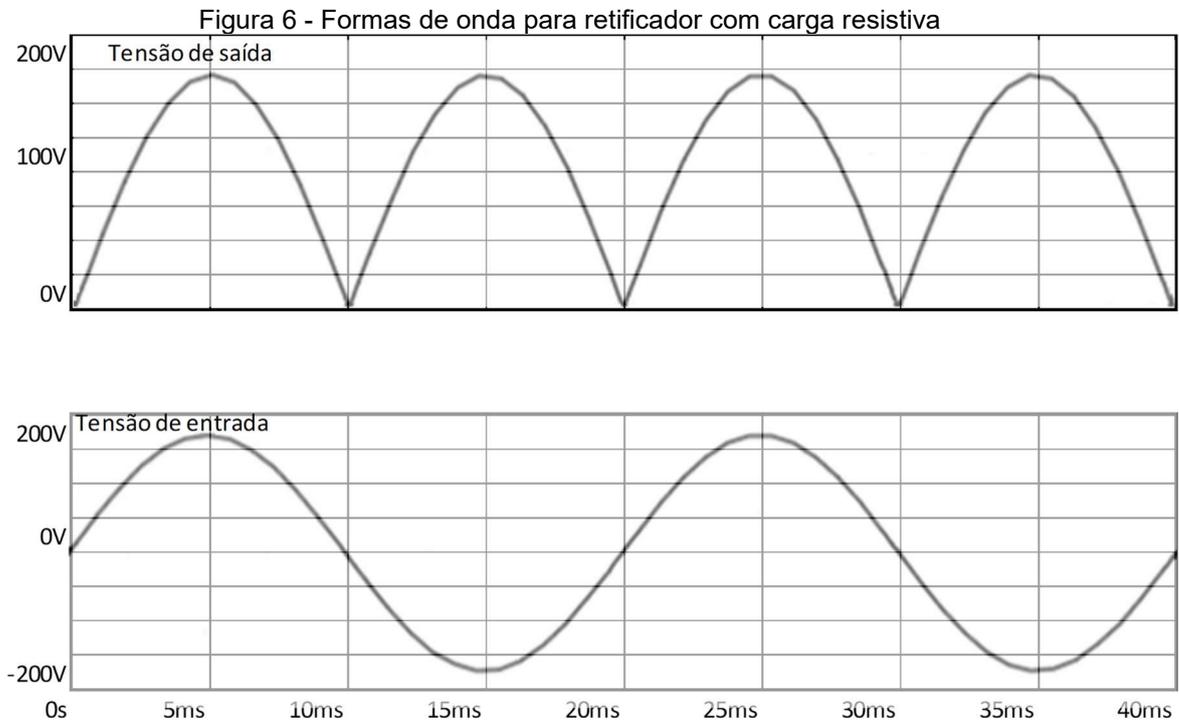
A Figura 5 mostra topologias de retificadores a diodo (não-controlados). Neste caso não há possibilidade de controlar a tensão de saída devido à ausência de interruptores controláveis. Têm-se os três tipos básicos de carga: resistiva, capacitiva e indutiva.

Figura 5 - Retificadores monofásicos não-controlados, de onda-completa



Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

Com carga resistiva (Figura 5.a) as formas de onda da tensão e da corrente na saída do retificador e na carga são as mesmas, como mostrado na Figura 6. A corrente de entrada apresenta-se com a mesma forma e fase da tensão.



Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

Um retificador com carga capacitiva (Figura 5.b) faz com que a tensão de saída se apresente alisada, elevando o seu valor médio em relação à carga resistiva. O capacitor carrega-se com a tensão de pico da entrada (desprezando a queda nos diodos). Quando a tensão de entrada se torna menor do que a tensão no capacitor os diodos ficam bloqueados e a corrente de saída é fornecida exclusivamente pelo capacitor, o qual vai se descarregando, até que, novamente, a tensão de entrada fique maior, recarregando o capacitor. A forma de onda da corrente de entrada é muito diferente de uma senóide, apresentando pulsos de corrente nos momentos em que o capacitor é recarregado, como mostrado na Figura 7.

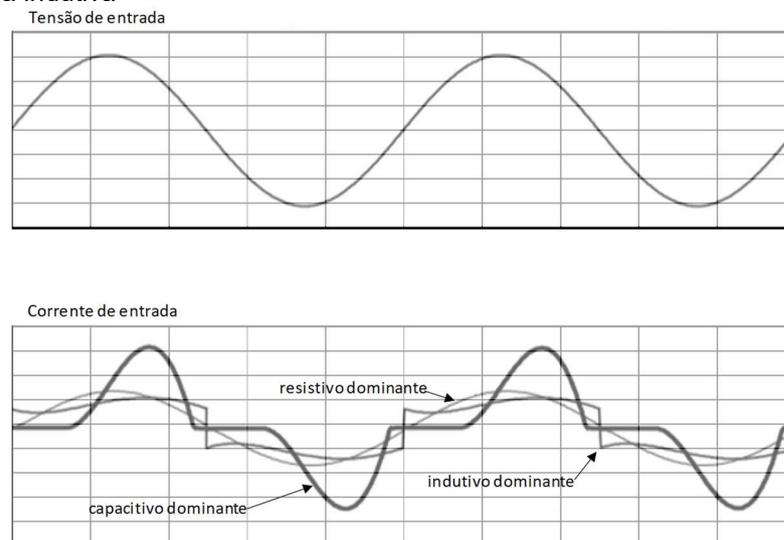
Figura 7 - Formas de onda para retificador monofásico não-controlado, onda completa, com carga capacitiva



Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

Nota-se que o retificador com carga indutiva (Figura 5.C), o comportamento da carga é de uma fonte de corrente. A Figura 8 mostra que a corrente de entrada pode apresentar-se quase como uma corrente quadrada, de acordo com o valor da indutância.

Figura 8 - Formas de onda no lado CA para retificador monofásico, onda-completa, não-controlado, alimentando carga indutiva

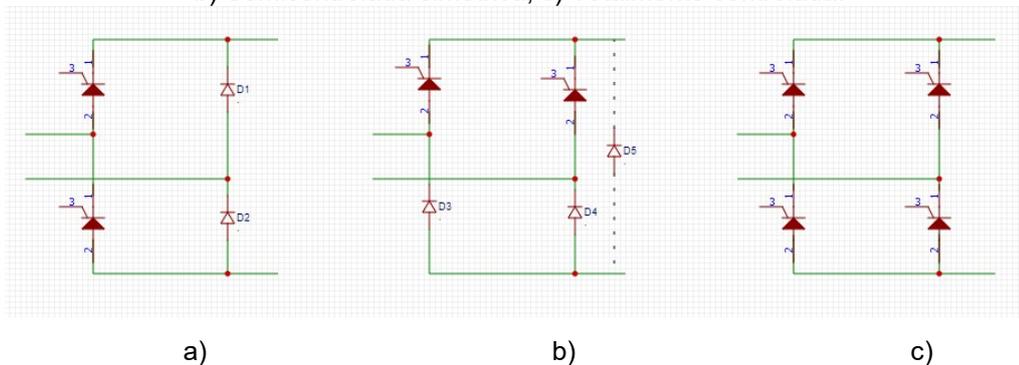


Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

4.5 Retificadores Controlados

Os circuitos retificadores controlados constituem a principal aplicação dos tiristores em conversores estáticos. Possuem vasta aplicação industrial, no acionamento de motores de corrente contínua, em estações retificadoras para alimentação de redes de transmissão CC, no acionamento de locomotivas, etc. A Figura 9 mostra 3 estruturas de pontes retificadoras monofásicas.

Figura 9 - Pontes retificadoras monofásicas: a) Semicontrolada assimétrica; b) Semicontrolada simétrica; c) Totalmente controlada.

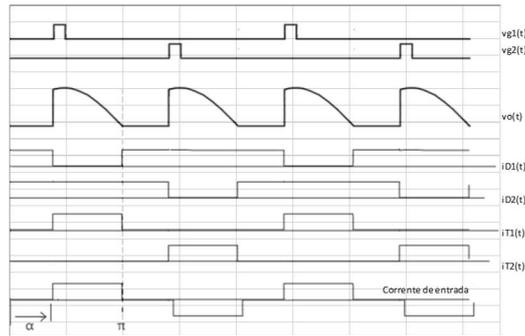


Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

4.5.1 Ponte semicontrolada assimétrica (Figura 9.a)

Na ponte assimétrica, cujas formas de onda estão mostradas na Figura 10, existe um caminho de livre-circulação formado pelos diodos D1 e D2. Supondo a polaridade da tensão da entrada como indicada na Figura 10.a, o disparo de T1 conecta a entrada à carga (suposta indutiva) através do tiristor e D2. Quando a tensão de entrada se inverte, D1 entrará em condução e T1 cortará. Enquanto, devido ao tempo de desligamento do tiristor, T1, D1 e D2 conduzirem, a fonte estará curto-circuitada, com sua corrente sendo limitada pela impedância da fonte. Quando T2 for disparado, D2 cortará.

Figura 10 - Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada assimétrica, com carga altamente indutiva



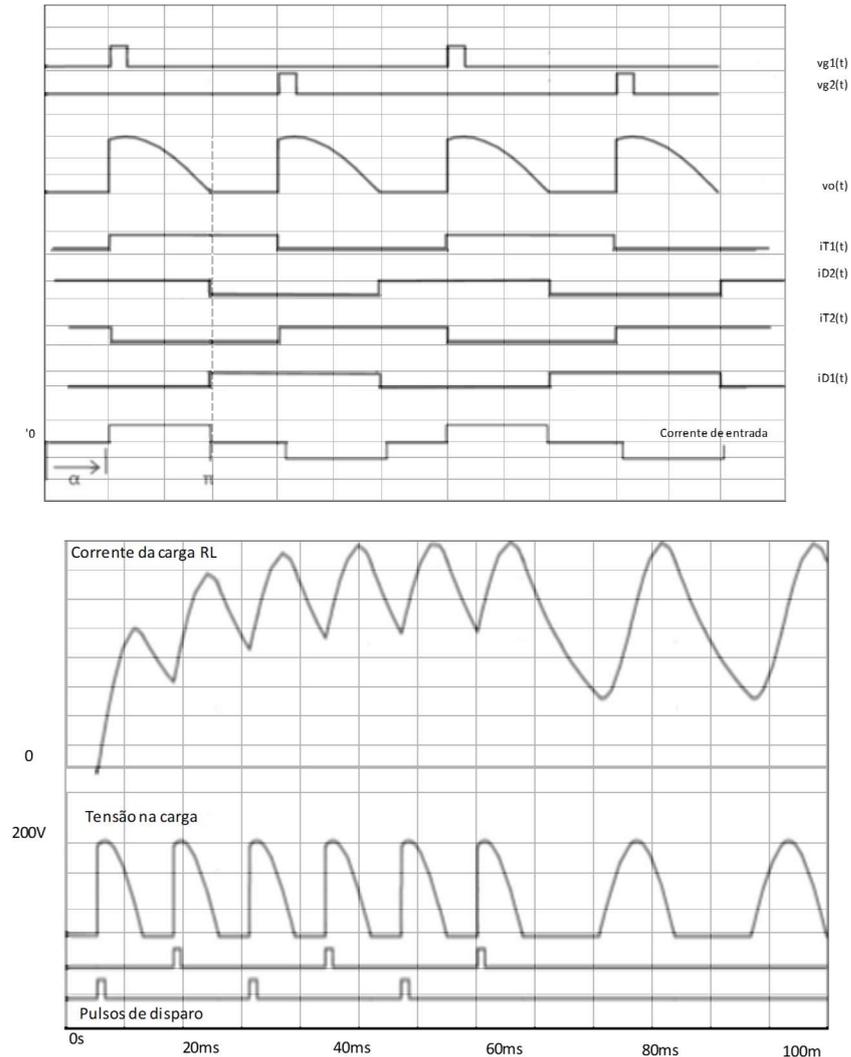
Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

4.5.2 Ponte semicontrolada simétrica (Figura 9.b)

Neste circuito não existe um caminho natural de livre-circulação, a qual deve ocorrer sempre através de um SCR e um diodo. As mesmas equações da ponte assimétrica são válidas para este conversor.

Supondo $v_i(t)$ com a polaridade indicada, quando T1 for disparado, a corrente circulará por T1 e D2. Quando a tensão da fonte inverter a polaridade, D1 entrará em condução e D2 bloqueará. A tensão na carga será nula pois T1 e D1 conduzirão, supondo que a corrente não se interrompa (carga indutiva). Quando T2 for disparado, T1 bloqueará. Diodos e tiristores conduzem, cada um por 180° . Note que se T2 não for disparado, e supondo que T1 continue a conduzir, em função da elevada constante de tempo elétrica da carga, no próximo semiciclo positivo a fonte será novamente acoplada à carga fornecendo-lhe mais corrente. Ou seja, a simples retirada dos pulsos de disparo não garante o desacoplamento entre carga e fonte. Para que isso ocorra é necessário diminuir o ângulo de disparo para que a corrente se torne descontínua e assim T1 corte. Obviamente o mesmo comportamento pode ocorrer com respeito ao outro par de componentes. Este comportamento é ilustrado na Figura 12. Isto pode ser evitado pela inclusão do diodo de livre-circulação D3, o qual entrará em condução quando a tensão se inverter, desligando T1 e D1. A vantagem da montagem assimétrica é que os catodos estão num mesmo potencial, de modo que os sinais de acionamento podem estar num mesmo potencial.

Figura 11 - Formas de onda de ponte retificadora semicontrolada simétrica, com carga altamente indutiva. Funcionamento normal (superior) e efeito da supressão dos pulsos de comando (inferior)



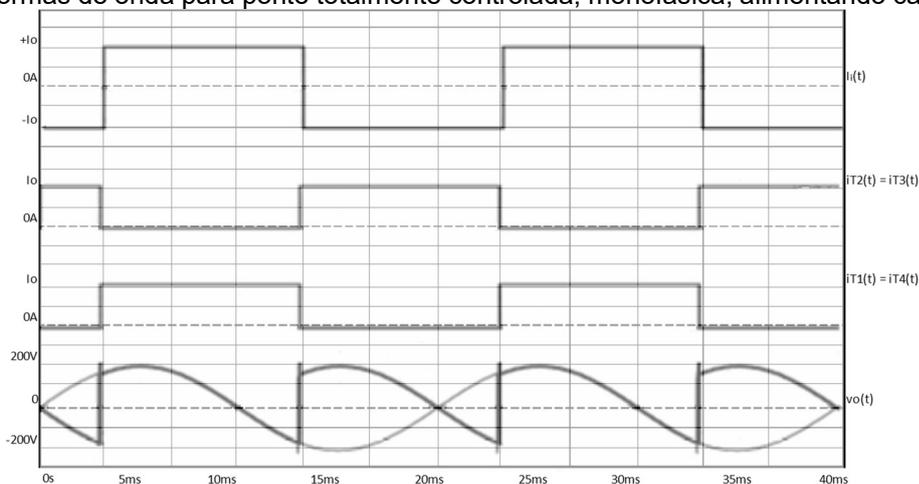
Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

4.5.3 Ponte totalmente controlada (Figura 9.c)

Como esclarece Pomílio (2014a) a principal utilização da Ponte totalmente controlada é no acionamento motor CC necessita operar em dois quadrantes tanto tensão quanto corrente, em circuitos que não poderá haver a inversão da polaridade da corrente, em que é mantida a polaridade da tensão E_g e não seja possível a frenagem da máquina. Desde que exista um elemento indutivo que mantenha a circulação das correntes pelos tiristores, a tensão na carga pode se tornar negativo mesmo quando polarizados reversamente. A indutância acumulada é a energia que

retornou à fonte. Na figura 12 apresentam-se as formas de ondas típicas. Deve-se disparar os componentes T1 e T4, T2 e T3 simultaneamente para garantir o caminho da corrente através da fonte. Quando a condução estiver contínua, o par de tiristores desligará quando inverter a polaridade da fonte e no momento que disparar outro par de tiristores. Porém, quando a corrente estiver descontínua, quando a corrente for inferior à corrente de manutenção, os tiristores serão desligados. Então, a tensão nos terminais do retificador será negativa, se houver inversão na polaridade da tensão de entrada e não for acionado o outro par de SCRs (POMÍLIO, 2014a).

Figura 12 - Formas de onda para ponte totalmente controlada, monofásica, alimentando carga indutiva



Fonte: Adaptado de Pomílio (2014a).

4.6 Inversor trifásico

Neste projeto o inversor estará recebendo do retificador a energia em sua forma contínua, ou seja, o retificador entregará ao inversor tensão contínua, o qual irá convertê-la em tensão alternada trifásica.

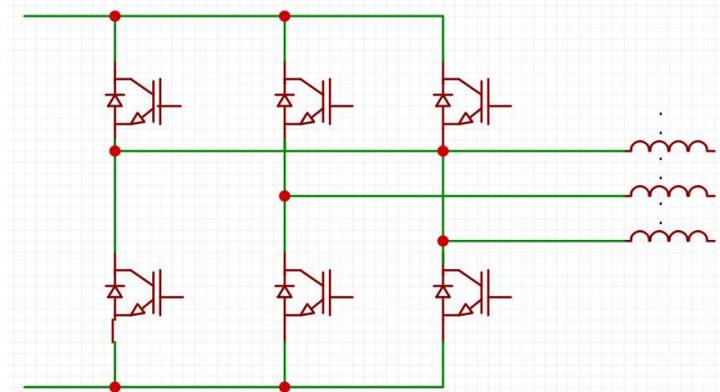
O principal papel dos inversores nos sistemas de geração distribuída e de acumuladores de energia é entregar energia elétrica em corrente alternada, dentro de padrões de qualidade adequados. Isso requer, principalmente, que a forma de onda da corrente resultante tenha mínima distorção, ou seja, que se aproxime da forma senoidal.

4.6.1 Inversor tipo fonte de tensão (VSI - Voltage Source Inverter)

Na Figura 13 apresenta-se a estrutura básica de um inversor fonte de tensão para uma conexão trifásica. Os diodos presentes no circuito garantem uma

bidirecionalidade no sentido da corrente, necessária à correta operação do conversor. Se o VSI operar com potência ativa, deve haver uma fonte de energia no barramento CC. Caso o conversor opere apenas com potência não ativa (harmônicas e reativa), o barramento CC pode ser formado apenas por um capacitor.

Figura 13 - Inversor trifásico tipo fonte de tensão



Fonte: Adaptado de Pomílio (2014b).

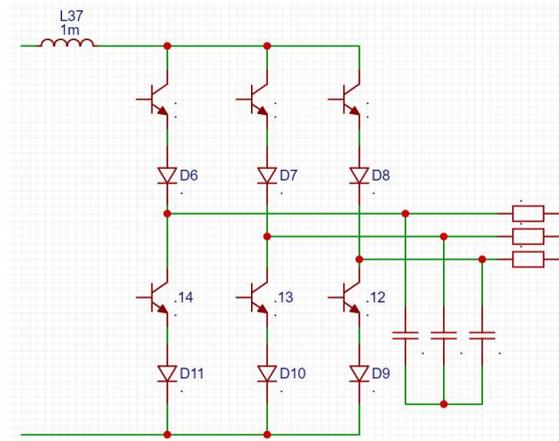
4.6.2 Inversor tipo fonte de corrente

Desde que se disponha de uma fonte de corrente CC (CSI – Current Source Inverter) pode-se aplicar técnicas de modulação de largura de pulso (ou outra qualquer), à semelhança do que se faz com os VSI. O que garante o comportamento como uma fonte de corrente é a presença de uma indutância no barramento CC. O circuito de controle do conversor atua de modo a manter constante tal corrente. Se o CSI operar com potência ativa, é preciso haver uma fonte de energia no barramento CC. Em caso de produção de energia não ativa, é suficiente a presença apenas de um indutor.

Os interruptores a serem usados no circuito devem permitir passagem de corrente num único sentido e serem capazes de bloquear tensões com ambas polaridades. Deve-se garantir que haja sempre uma chave em condução em cada semiponte. A Figura 14 mostra uma topologia deste tipo.

Caso a impedância da carga (ou da rede CA) seja indutiva (que é a situação mais usual), é necessária a colocação de capacitores na saída do inversor de modo a acomodar as diferenças instantâneas nos valores das correntes nos lados CC e CA. Tais capacitâncias podem provocar ressonâncias com as componentes indutivas do circuito, devendo-se controlar a tensão sobre os capacitores.

Figura 14 - Inversor fonte de corrente MLP utilizando IGBT



Fonte: Adaptado de Pomílio (2014b).

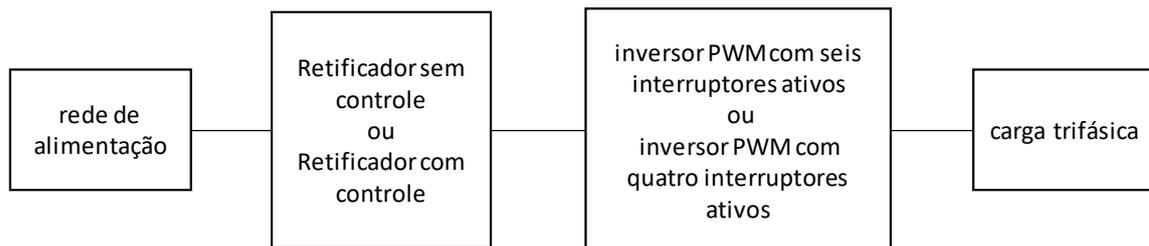
5 TOPOLOGIAS

As topologias podem ser divididas em duas categorias:

1. Conversor sem controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor;
2. Conversor com controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor.

O diagrama de blocos da Figura 15 caracteriza o funcionamento das estruturas.

Figura 15 - Diagramas de blocos



Fonte: Adaptado de Guedes (2000).

A partir desta divisão em duas categorias, apresentam-se algumas possibilidades em meia ponte e ponte completa e também a topologia convencional, ou a mais básica, mostrada na Figura 16, que possui um conversor boost acoplado (ENJETI; RAHMAN, 1993; MANIAS; ZIOGAS, 1987). Na sequência apresentam-se topologias.

5.1 Conversor sem controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor

Nesta parte do trabalho apresenta-se sucintamente o funcionamento de algumas topologias sem controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor com resultados obtidos de algumas simulações das formas de onda de corrente e de tensão da entrada e da saída do conversor.

5.1.1 Topologia Convencional

A Figura 16 apresenta a topologia convencional proposta do conversor monofásico-trifásico (ENJETI; RAHMAN, 1993; MANIAS; ZIOGAS, 1987) que emprega na entrada um retificador e um capacitor de filtragem para gerar o barramento contínuo. Apresenta também seis interruptores ativos comandados por PWM para gerar as ondas trifásicas.

Esta estrutura apresenta algumas desvantagens:

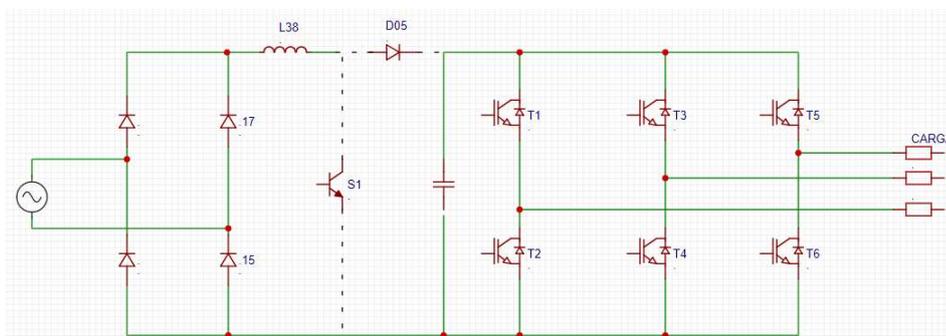
- ✓ Má qualidade na corrente de entrada;
- ✓ Alto conteúdo harmônico e defasado da tensão de entrada;
- ✓ Fluxo de potência unidirecional, isto é, somente da linha para a carga não permitindo regulação de linha;

Não permite frenagem regenerativa na alimentação de uma carga tipo motor.

Pode-se ter um controle ativo do formato da corrente de entrada adicionando-se um pré-regulador boost, com isso melhora-se a qualidade de corrente quanto a seu harmônico, sem, no entanto, facilitar a bidirecionalidade do fluxo da potência. Perante flutuações da tensão de entrada a rede de alimentação monofásica não pode ser regulada.

Este projeto de conversor monofásico-trifásico mostra-se muito interessante pois oferece a possibilidade ou não de incrementar o regulador boost, basta simplesmente adicionar ao circuito o interruptor S1 e o diodo D05, dependendo muito da necessidade requerida na aplicação final do projeto.

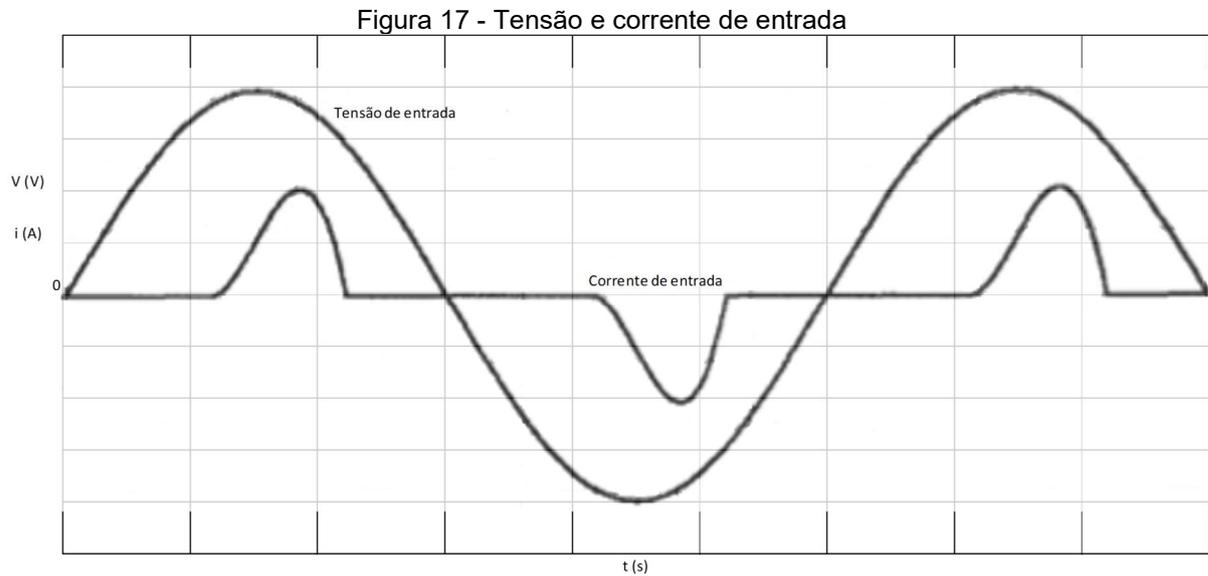
Figura 16 - Topologia convencional do conversor monofásico - trifásico



- a) Sem conversor boost (sem as linhas contínuas)
- b) Com conversor boost (adicionar as linhas contínuas)

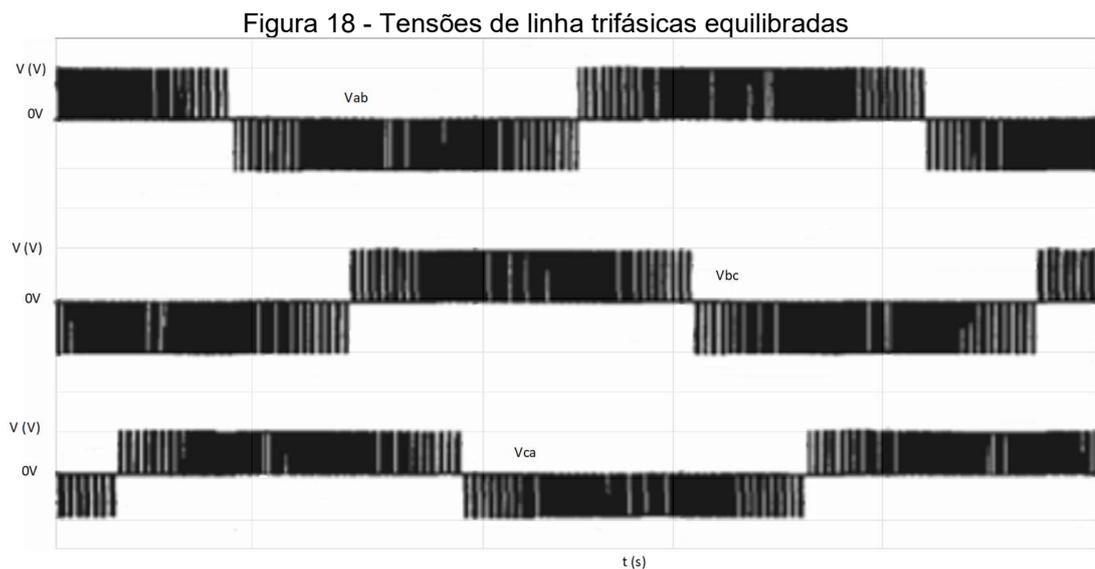
Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993; MANIAS; ZIOGAS, 1987).

A Figura 17 apresentam-se as formas de onda de tensão e de corrente de entrada da estrutura conversora.



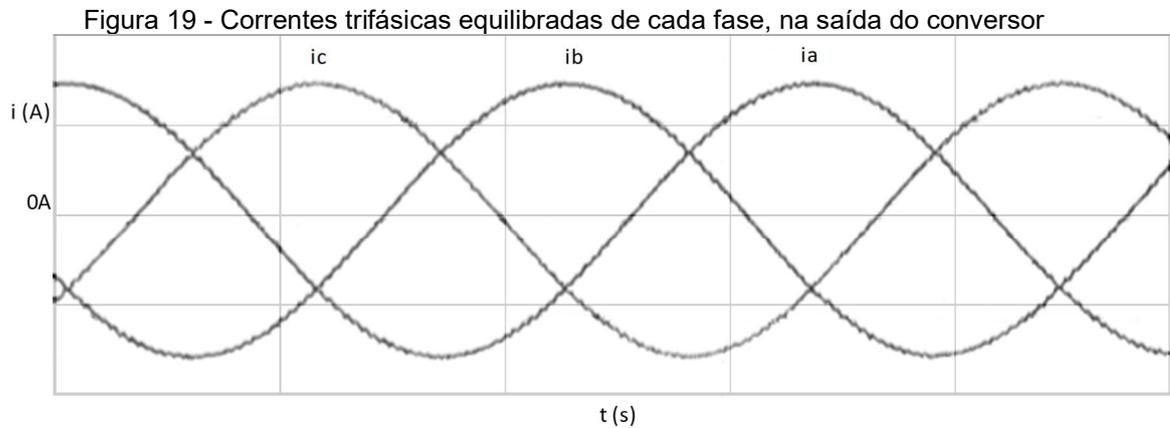
Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993; MANIAS; ZIOGAS, 1987).

Na Figura 18 apresentam-se as tensões trifásicas de saída do conversor, as quais irão alimentar a carga. Pode-se observar que estas tensões estão defasadas de 120° e possuem a mesma amplitude, respeitando a configuração de um sistema de alimentação trifásico.



Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993; MANIAS; ZIOGAS, 1987).

Na Figura 19 são apresentadas as correntes em cada uma das fases, também com as características do sistema trifásico.

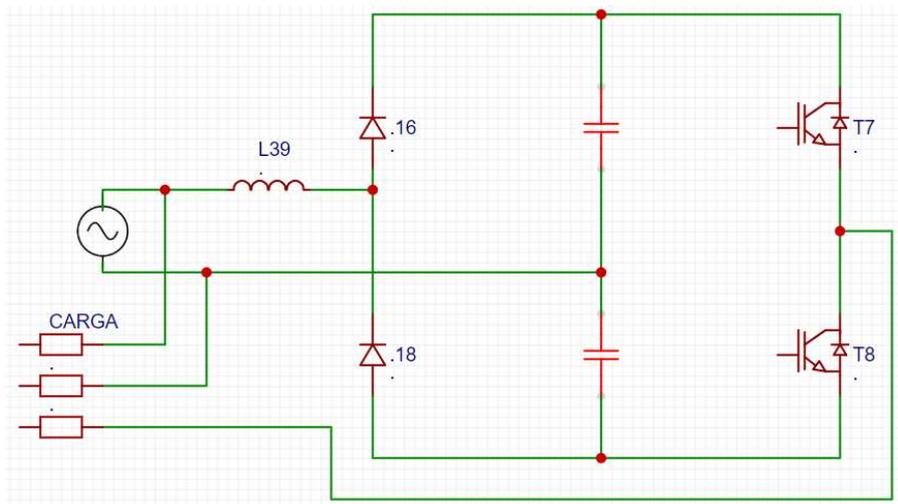


Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993; MANIAS; ZIOGAS, 1987).

5.1.2 Topologia meia ponte sem controle ativo de corrente de entrada

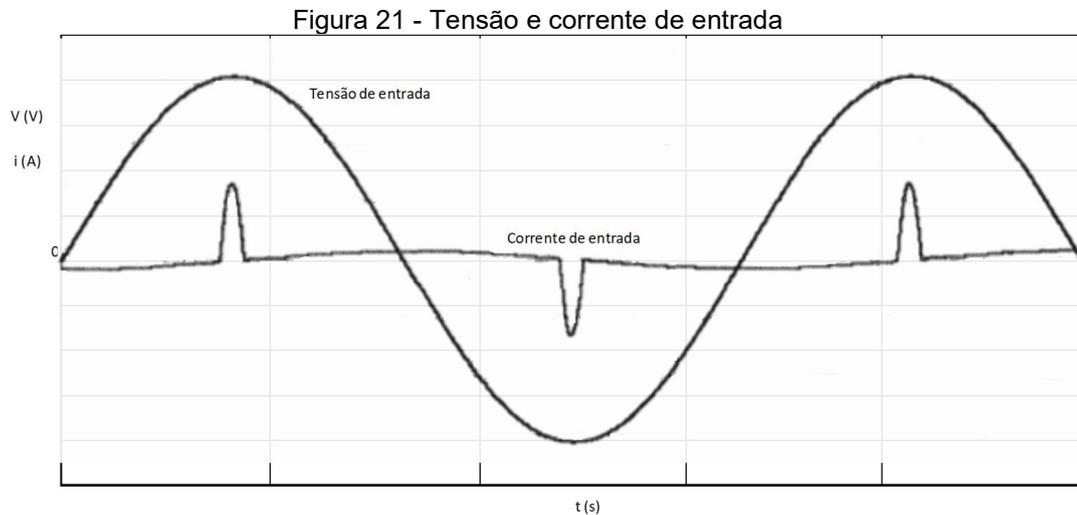
A proposta apresentada na Figura 20, utiliza menor quantidade de semicondutores, utiliza técnicas avançadas PWM para selecionar e eliminar as harmônicas de baixa ordem, garantindo uma ótima qualidade na forma senoidal da saída (ENJETI, 1990).

Figura 20 - Conversor monofásico - trifásico meia ponte sem controle ativo do formato da corrente de entrada



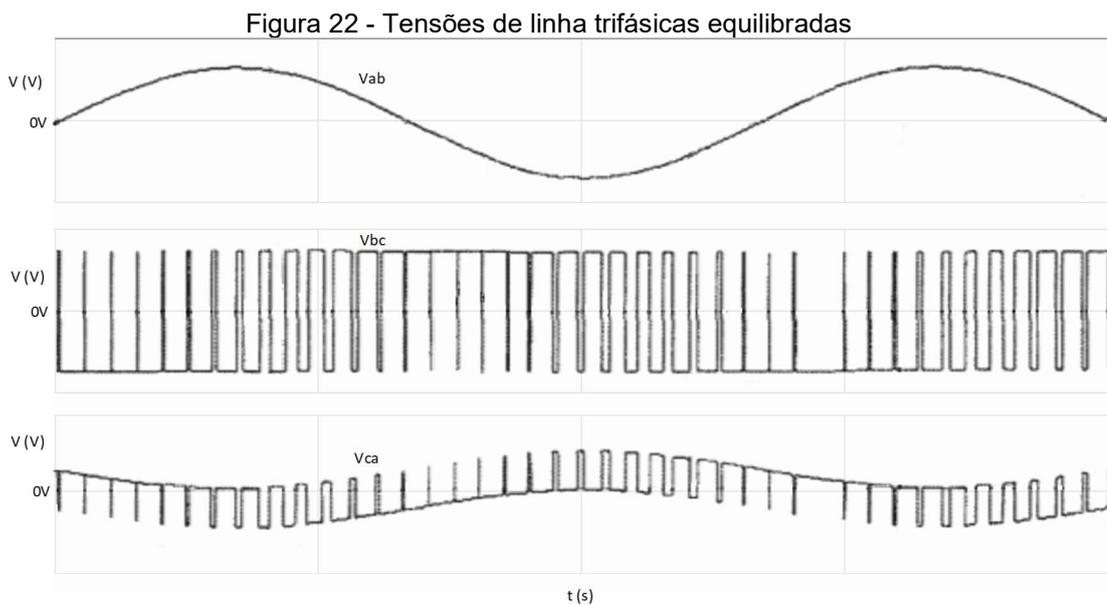
Fonte: Adaptado de Enjeti (1990).

Na Figura 21 apresentam-se as formas de onda de tensão e corrente de entrada do conversor.



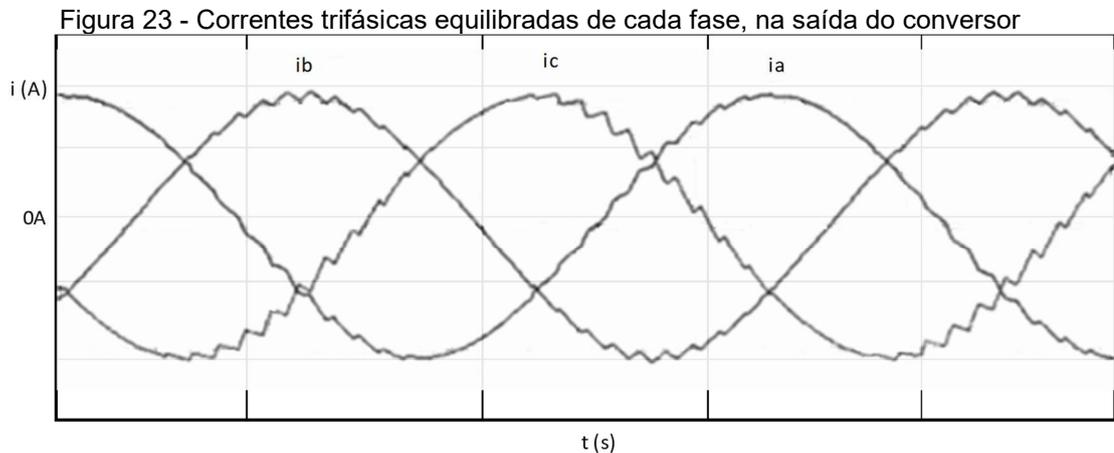
Fonte: Adaptado de Enjeti (1990).

Na Figura 22 mostram-se as formas de ondas das tensões trifásicas de linha do conversor meia ponte, sem controle ativo da forma de onda da corrente de entrada do conversor que irão alimentar a carga. Observa-se que as tensões estão equilibradas e defasadas respeitando a forma de onda de um sistema trifásico.



Fonte: Adaptado de Enjeti (1990).

Pode-se observar na Figura 23 que as correntes em cada uma das fases na saída do conversor onde se observa que as correntes estão equilibradas e defasadas respeitando a forma de onda de um sistema trifásico.



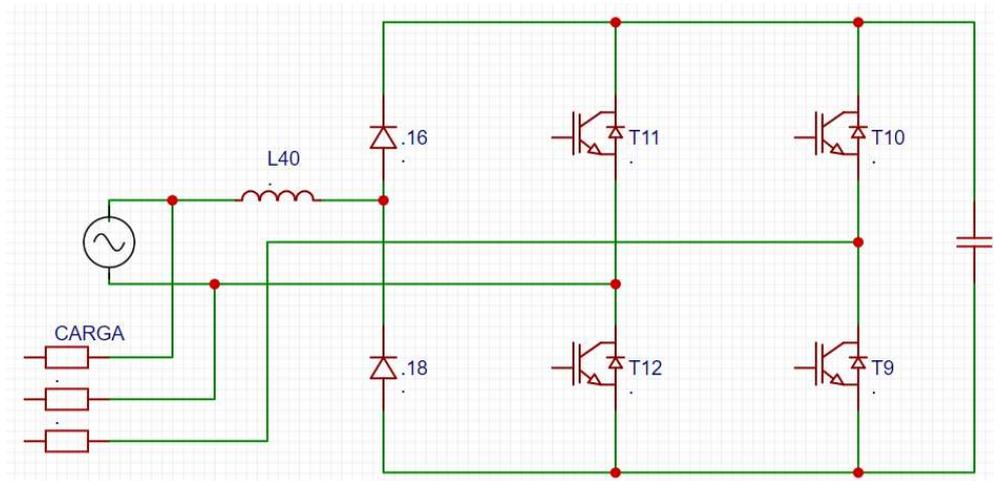
Fonte: Adaptado de Enjeti (1990).

5.1.3 Topologia ponte completa sem controle ativo de corrente de entrada

A estrutura apresentada na Figura 24, utiliza quatro interruptores ativos (T1 - T4) e dois diodos D1 e D2 (DIVAN, 1989) e como dito sem controle ativo da forma da corrente de entrada. Comparando com a Topologia meia ponte sem controle ativo de corrente de entrada da Figura 20, são menores a tensão sobre os interruptores ativos, a capacitância dos capacitores do barramento de tensão contínua e a relação V.A. Esta estrutura não permite controle ativo da forma de onda da corrente de entrada e nem o controle do fator de potência a partir da rede.

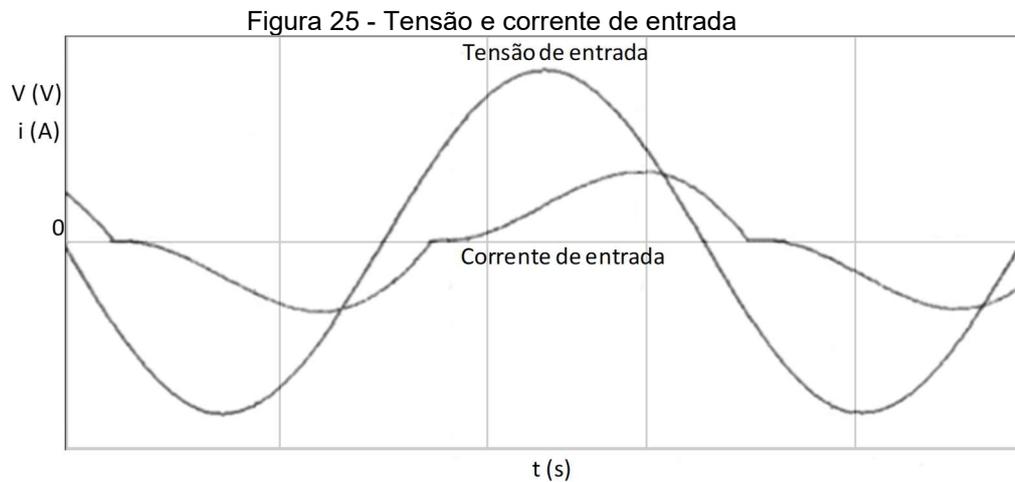
Esta estrutura oferece uma má qualidade na forma de onda da corrente de entrada com elevado conteúdo harmônico e defasada em relação a tensão de entrada do conversor.

Figura 24 - Conversor monofásico - trifásico ponte completa sem controle ativo do formato da corrente de entrada



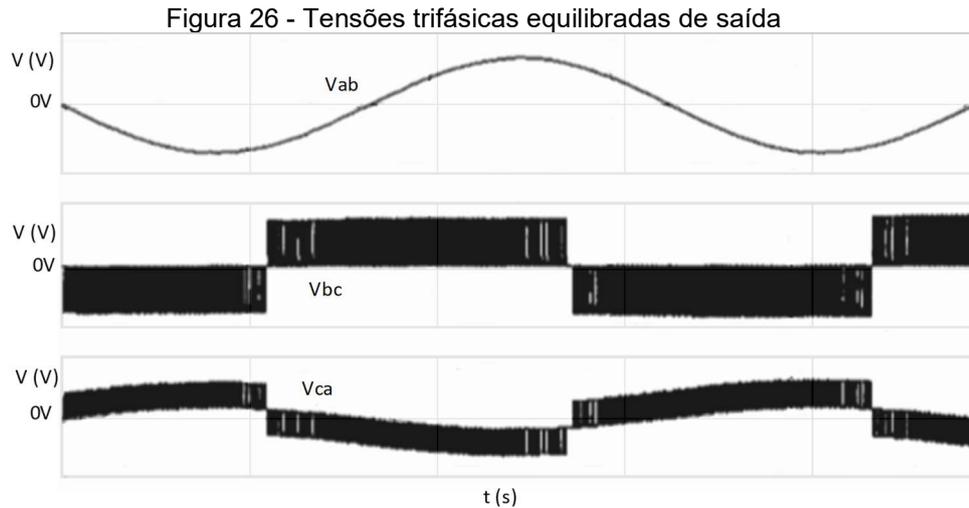
Fonte: Adaptado de Divan (1989).

Na Figura 25 apresentam-se as formas de onda de tensão e corrente de entrada do conversor.



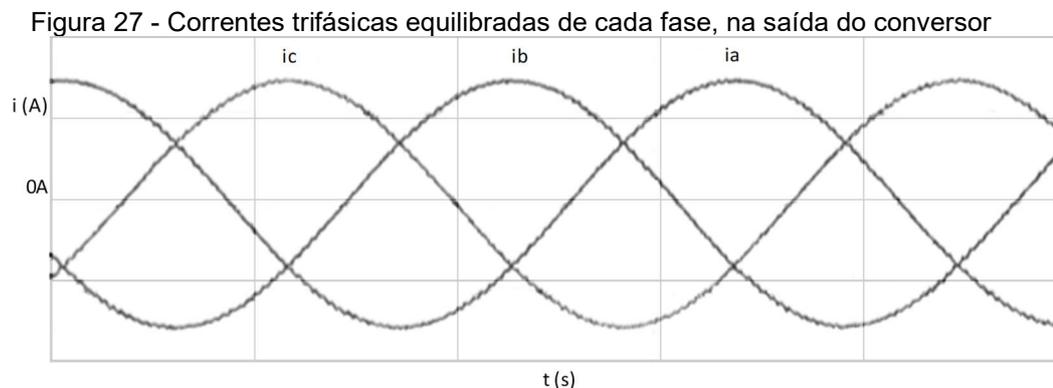
Fonte: Adaptado de Divan (1989).

Na Figura 26 são apresentadas as formas de ondas das tensões trifásicas de linha do conversor.



Fonte: Adaptado de Divan (1989).

Na Figura 27 são apresentadas as formas de onda das correntes trifásicas equilibradas, apresentando uma adequada formação de um sistema de alimentação trifásico.



Fonte: Adaptado de Divan (1989).

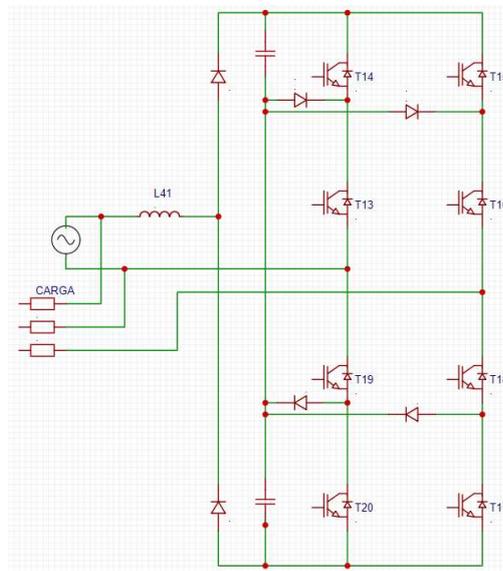
5.1.4 Topologia com grampeamento no ponto neutro

Topologia deste conversor apresentado na Figura 28 em razão dos capacitores da conexão contínua permite que os dois diodos D1 e D2 sejam carregados pela fonte V_i . São gerados três níveis de tensões V_{bn} e V_{cn} que são defasadas em 120° entre si a partir dos comandos PWM sobre os interruptores T11 a T14 e T21 a T24 (ENJETI, 1990). O resultado da tensão V_{bc} são cinco níveis PWM e não contém as harmônicas de terceira ordem. As formas de ondas apresentada nas saídas dos terminais a, b e c são equilibradas e de alta qualidade, ou seja, apresenta menos harmônico.

Os diodos grampeadores asseguram que cada interruptor seja submetido à metade da tensão do barramento de corrente contínua. Este aspecto particular facilita o uso desta topologia em alta tensão e alta potência.

Como dito, esta topologia não permite controle ativo no formato da corrente de entrada, um alto conteúdo harmônico e defasada em relação a tensão de entrada, o fluxo de energia é unidirecional e, conseqüentemente não oferecendo frenagem degenerativa, não permite controle do fator de potência.

Figura 28 - Conversor monofásico - trifásico com grampeamento no ponto neutro



Fonte: Adaptado de Enjeti (1990).

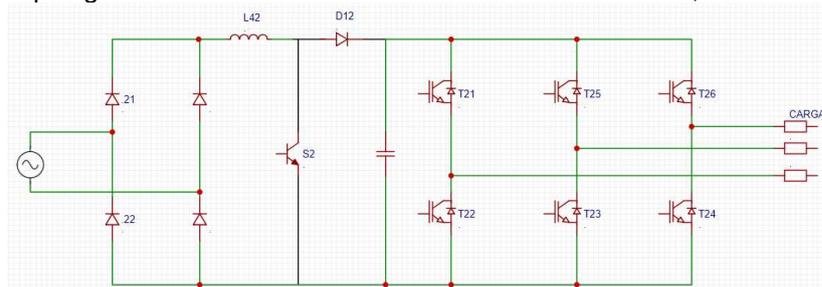
5.2 Conversor com controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor

Nesta parte do trabalho apresenta-se sucintamente o funcionamento de algumas topologias com controle ativo do formato da corrente de entrada do conversor com resultados obtidos de algumas simulações das formas de onda de corrente e de tensão da entrada e da saída do conversor.

5.2.1 Topologia Convencional com o conversor Boost

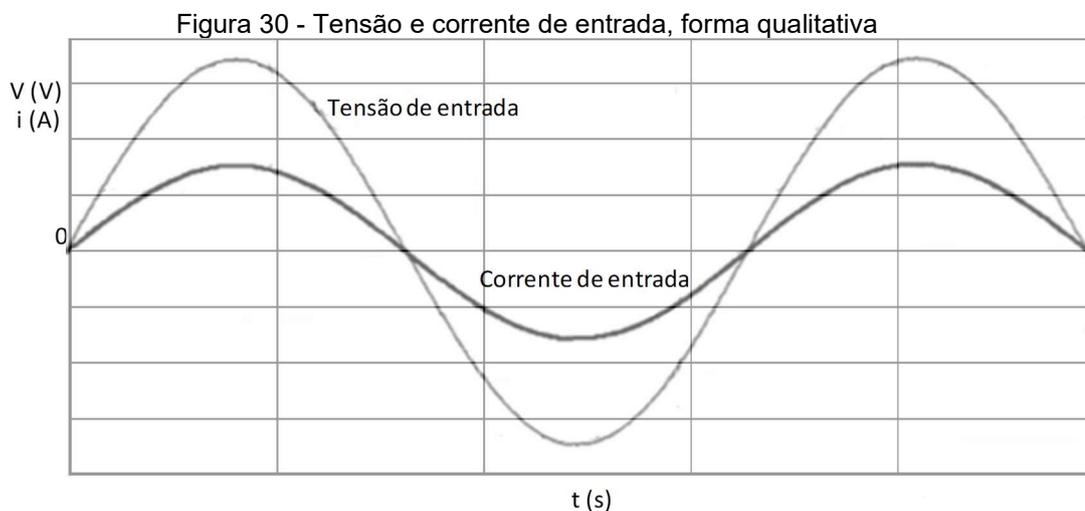
Esta estrutura diferencia-se da Topologia Convencional, pois permite o controle ativo do formato da corrente de entrada, para isto, é necessário ser adicionado o pré-regulador boost. Esta estrutura está representada na Figura 29. Neste caso melhora-se a qualidade das correntes requeridas, quanto ao seu conteúdo harmônico, sem, no entanto, facilitar a bidirecionalidade do fluxo de potência. A rede de alimentação monofásica não pode ser regulada perante flutuações da tensão de entrada. Para se obterem as tensões trifásicas equilibradas de saída utiliza-se um inversor PWM senoidal. Este inversor apresenta seis interruptores ativos. As formas de onda da tensão e corrente de entrada do conversor diferem-se da topologia convencional por serem senoidais e em fase, gerando fator de potência unitário. (GUEDES, 2000).

Figura 29 - Topologia convencional do conversor monofásico-trifásico, com o conversor boost



Fonte: Adaptado de Guedes (2000).

Na Figura 30 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente de entrada, nota-se as formas de onda senoidais e em fase.



Fonte: Adaptado de Guedes (2000).

As formas de onda das tensões trifásicas equilibradas de linha e das correntes de linha são exatamente as mesmas representadas nas Figura 18 e Figura 19.

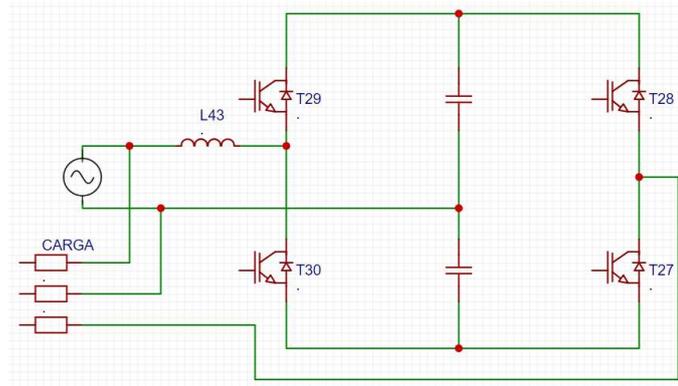
5.2.2 Topologia meia ponte com controle ativo de corrente de entrada

A estrutura apresentada na Figura 31 diferencia-se da Topologia meia ponte sem controle ativo de corrente de entrada (Figura 20) pela presença de mais dois interruptores ativos T1 e T2 em que se tem por finalidade adequar a corrente de entrada formatando-a para senoidal e em fase com a tensão de entrada do conversor. Os interruptores ativos T1 e T2 são controlados através da estratégia de modulação PWM sincronizado com tensão de entrada, garantindo com isto que a forma da corrente de entrada seja senoidal e esteja em fase com a tensão. Os interruptores T3 e T4 são operados de maneira PWM para gerar a tensão V_{bc} , conforme demonstrada anteriormente na Figura 22.

Pode-se dizer que a tensão em V_{ab} é a tensão de alimentação. Para a eliminação das harmônicas de baixa ordem, utiliza-se a técnica PWM (ENJETI, 1990) para o controle dos interruptores T1 e T2, para filtrar as harmônicas de alta ordem utiliza-se o indutor L_i . Permite-se um menor indutor de filtragem na escolha da frequência de comutação de T1 e T2. Esta topologia permite o controle ativo da forma de onda da corrente de entrada, em que corrente de entrada resultante i_i , é senoidal de alta qualidade, com baixa distorção e em fase em relação a tensão de entrada, e o fator de potência é próximo do unitário. Possibilita que fluxo de energia seja bidirecional, conseqüentemente, frenagem regenerativa.

Esta estrutura apresenta como desvantagem o fato dos interruptores em suas comutações sofrerem o dobro do pico da tensão de entrada.

Figura 31 - Conversor monofásico - trifásico meia ponte com controle ativo do formato da corrente de entrada



Fonte: Adaptado de Enjeti (1990).

As formas de onda da tensão e corrente de entrada para o pré-regulador boost com ponto médio, estão apresentadas na Figura 30, de forma qualitativa, utilizado também nesta topologia meia ponte.

As tensões trifásicas de saída, são as mesmas apresentadas na Figura 22, onde as tensões possuem a mesma amplitude e estão defasadas de 120° entre si, respeitando o princípio básico de um sistema trifásico.

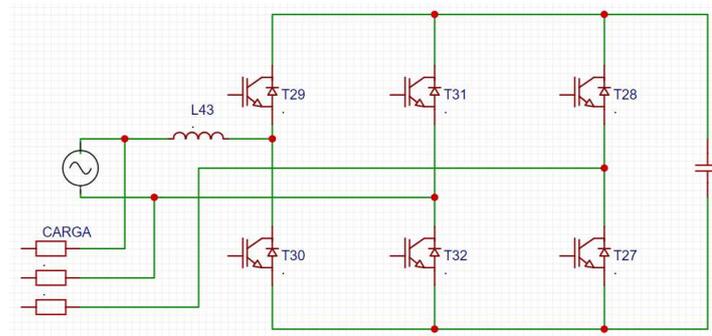
5.2.3 Topologia ponte completa com controle ativo de corrente de entrada

Na Figura 32 apresenta-se a Topologia ponte completa com controle ativo de corrente de entrada em que, para a corrente de entrada possa ser senoidal, os interruptores T1 e T2 são controlados pela estratégia PWM, no instante em que a tensão de entrada V_i for positiva, é colocado em condução o interruptor T2 que irá carregar o capacitor, conformando a corrente de entrada para senoidal e fator de potência unitário, quando V_i for negativo, o interruptor T1 faz esta função.

A tensão V_{bc} é gerada pelos interruptores T3 e T6 que defasados em 120° da tensão V_{ab} , dessa maneira, os resultantes de a, b e c são vetores trifásicos equilibrados.

A estrutura apresentada na Figura 32 apresenta alta qualidade na forma de onda da corrente de entrada, são menores a tensão nos interruptores ativos, a capacitância e a relação $V.A$ quando comparado com Conversor monofásico - trifásico meia ponte com controle ativo do formato da corrente de entrada apresentada na Figura 31, apresenta bidirecionalidade do fluxo de energia entre a fonte e a carga sem adição de outro estágio de potência.

Figura 32 - Topologia ponte completa com controle ativo de corrente de entrada



Fonte: Adaptado de Guedes (2000).

5.2.4 Topologia de Enjeti

Na Figura 33 apresenta-se a Topologia de Enjeti (ENJETI; RAHMAN, 1993; LARSEN *et al.*, 1998) que tem em sua entrada um retificador ativo em meia ponte que é responsável pela conexão contínua e pelo controle ativo da forma de onda da corrente de entrada e, também permite a bidirecionalidade do fluxo de energia entre a conexão contínua e a linha alternada principal.

Os interruptores T1 e T2 que são controlados pela técnica PWM retificam a entrada monofásica alternada, que carrega o banco capacitivo dividido na conexão contínua. Desta maneira garantem o formato da corrente de entrada onda senoidal e o fator de potência próximo ao unitário. A filtragem das correntes harmônicas mais altas fica por conta do indutor L_i . Os interruptores T3 a T6 são operados pela técnica PWM independente do pré-regulador boost utilizado.

Seguem vantagens deste conversor:

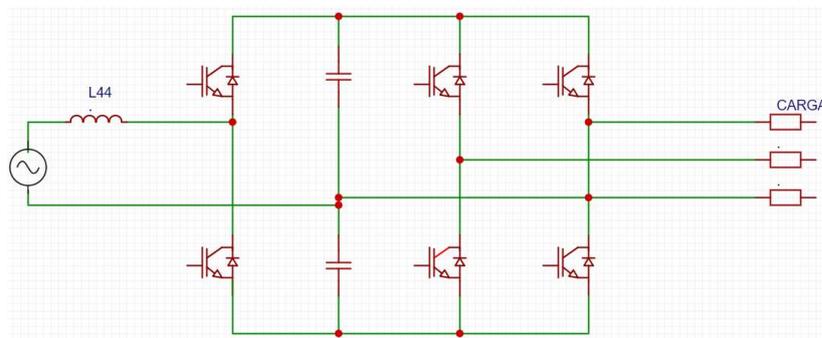
- ✓ emprega somente seis transistores ou interruptores IGBT, conseqüentemente implicando baixo custo;
- ✓ possui tensão e frequência de saída variáveis;
- ✓ produz corrente de entrada senoidal e fator de potência próximo ao unitário;
- ✓ fluxo de energia bidirecional entre a conexão contínua e a linha alternada principal, podendo produzir excelente regulação da tensão contra flutuações na tensão de entrada e facilita a frenagem regenerativa;
- ✓ é de tamanho compacto, já que a estrutura de seis interruptores do conversor seja disponível em módulos de diversos fabricantes;

- ✓ produz tensão trifásica de alta qualidade.

Essa topologia é aplicável às linhas MRT (monofilar com retorno pelo terra), pois utiliza uma das três fases de saída a partir do conversor como retorno.

As outras duas fases são produzidas por uma modulação PWM assimétrica. É conectado no centro dos capacitores o neutro da alimentação. O barramento contínuo fará a regulação da amplitude das três fases.

Figura 33 - Topologia proposta por Enjeti para o conversor monofásico-trifásico

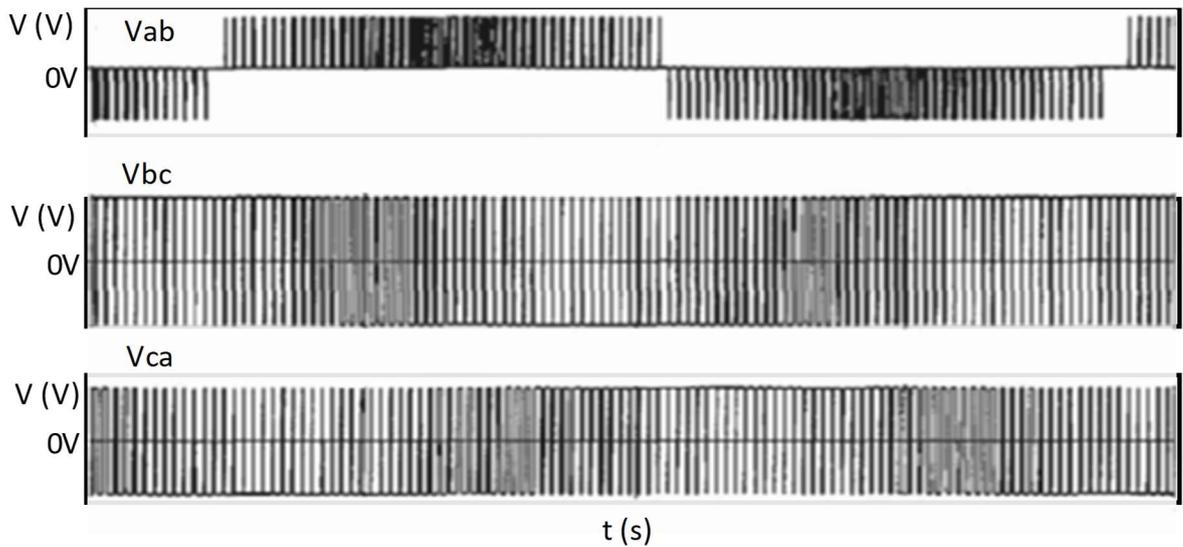


Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993).

As formas de onda da tensão e corrente de entrada para este conversor são idênticas às apresentadas na Figura 30.

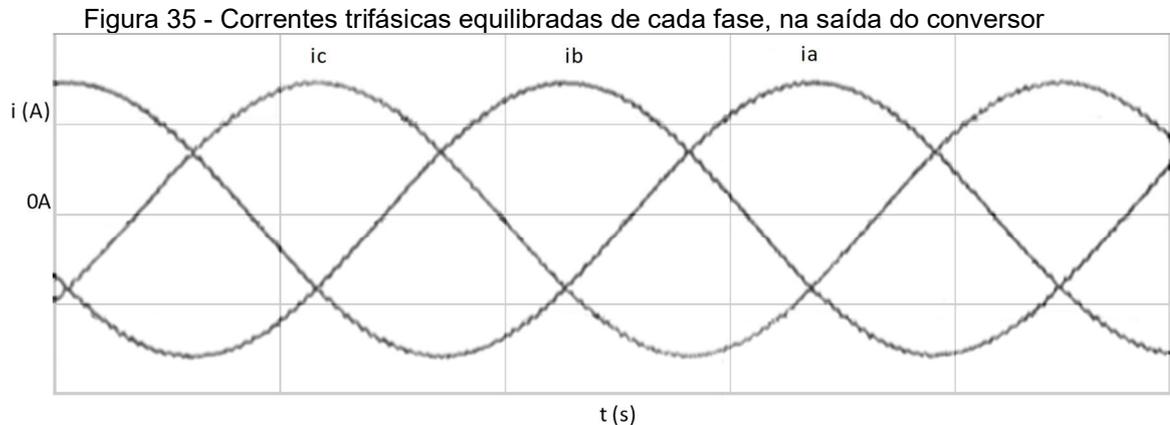
Na Figura 34 apresentam-se as formas de onda das tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , respectivamente. Trata-se de tensões trifásicas equilibradas e defasadas de 120° entre si. Examinando as tensões de linha deste sistema, percebe-se a presença de uma modulação PWM assimétrica na estrutura.

Figura 34 - Tensões trifásicas equilibradas de linha



Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993).

Na Figura 35 apresentam-se as correntes trifásicas equilibradas de linha.



Fonte: Adaptado de (ENJETI; RAHMAN, 1993).

5.2.5 Topologia de Douglas e Malengret

Apesar dessa topologia ser similar a Topologia proposta por Enjeti para o conversor monofásico-trifásico (Figura 33), o seu funcionamento é diferente.

O retificador na entrada garante que o formato da corrente de entrada de alimentação seja senoidal.

O primeiro braço do inversor é o retificador de entrada, é este braço que regula a primeira fase de saída do conversor. Praticamente o valor de pico dos interruptores é o valor do barramento contínuo, portanto, variando-se o barramento contínuo a amplitude da primeira fase pode ser controlada.

A tensão da primeira fase é atrasada em relação à tensão de entrada pelo ângulo ϑ . Um aumento em ϑ resulta em um aumento da tensão do barramento contínuo e além disso aumenta a tensão de fase.

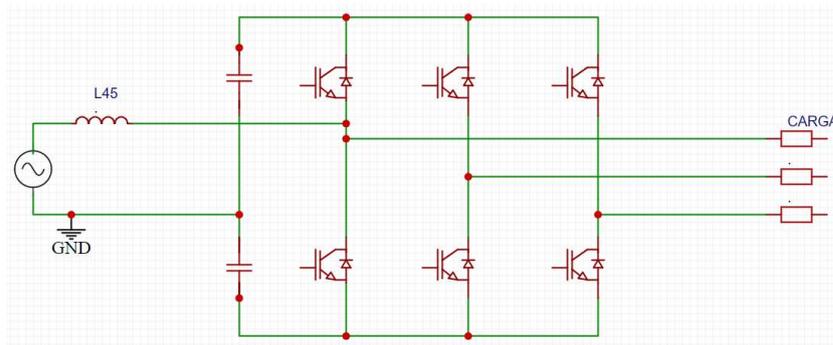
A regulação do conversor é dada pelo deslocamento de fase da modulação PWM senoidal para o primeiro braço.

Os interruptores T1 e T2 são controlados pela frequência de comutação e pelo ângulo de deslocamento da fase ϑ .

A topologia oferece controle ativo do formato da corrente de entrada, o fluxo de energia é bidirecional, conseqüentemente, frenagem regenerativa² e as sub-harmônicas de tensão de saída são baixas.

Como desvantagem com certeza é a alta tensão necessária no barramento quando se fala em acionamento de velocidade variável para motores com tensão mais elevadas (acima de 400 V), porém demonstra ser satisfatória para tensões mais baixas, como por exemplo para motores 110V.

Figura 36 - Topologia proposta por Douglas e Malengret para o conversor monofásico- trifásico



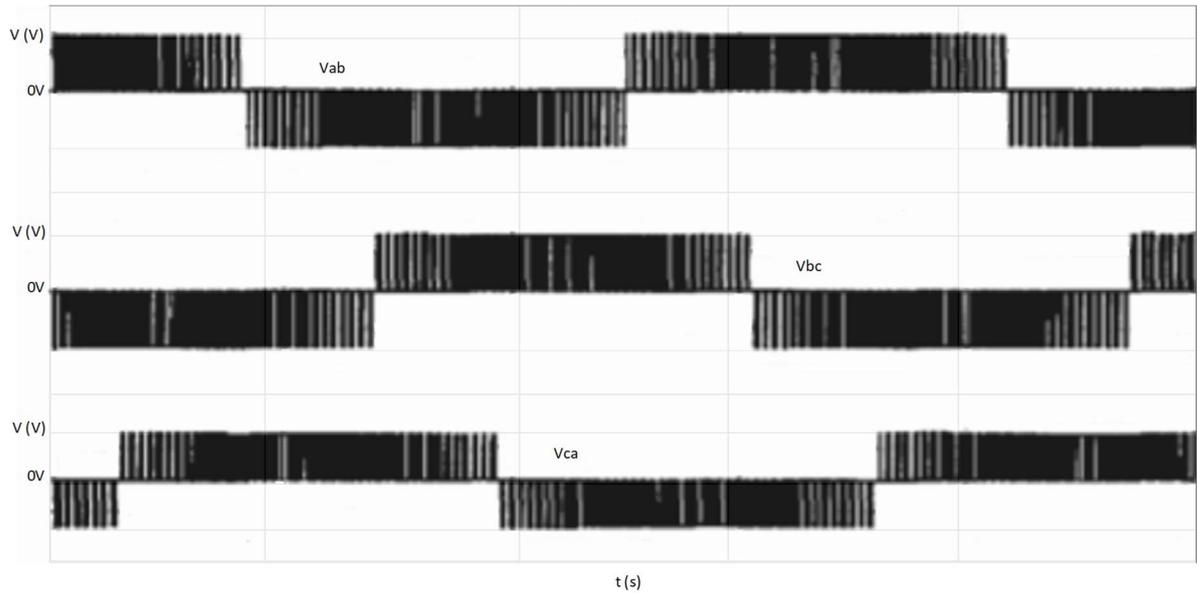
Fonte: Adaptado de (DOUGLAS; MALENGRET, 1998).

Na Figura 37 estão apresentadas as formas de onda das tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , respectivamente. As tensões estão equilibradas e defasadas de 120° entre

² Método da frenagem por contra-corrente, através da inversão da sequência de fases

si, respeitando o princípio do sistema trifásico. Observamos que as formas de onda são simétricas neste sistema.

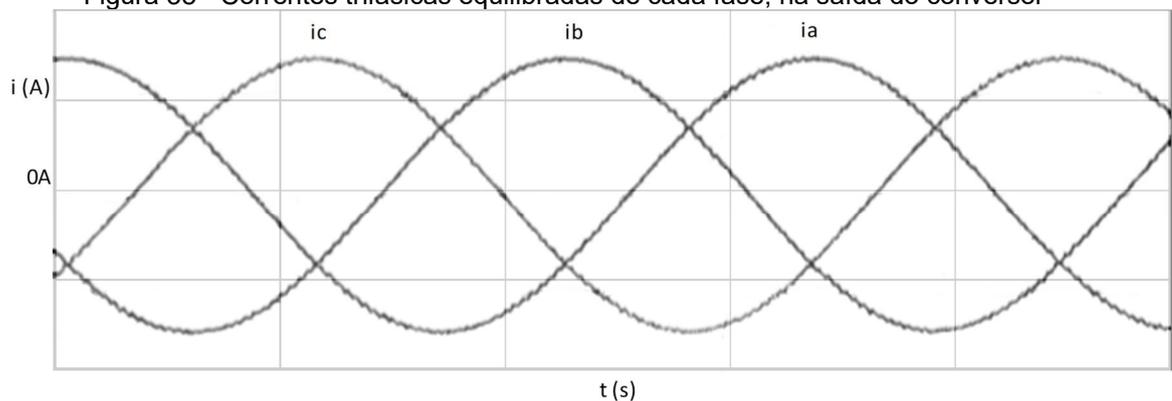
Figura 37 - Tensões trifásicas equilibradas de linha



Fonte: Adaptado de (DOUGLAS; MALENGRET, 1998).

A Figura 38 apresenta as formas de onda das correntes trifásicas equilibradas de linha.

Figura 38 - Correntes trifásicas equilibradas de cada fase, na saída do conversor



Fonte: Adaptado de (DOUGLAS, H; MALENGRET, 1998).

6 PSIM – SOFTWARE SIMULADOR DE CIRCUITOS PARA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E APLICAÇÕES EM ENERGIA ELÉTRICA

Conforme Objetivos Específicos, tem-se como uma das metas verificar o comportamento do conversor que utiliza como estrutura uma ponte retificadora monofásica semicontrolada simétrica e uma unidade inversora trifásica tipo fonte de tensão, através de simulações, analisando principalmente o fator de potência, distorção harmônica, as correntes de entrada e saída. Então, partiu-se para a definição do software eletrônico que mais se encaixava para o propósito do trabalho. Durante o curso, foram testados os programas Proteus (PROTEUS, 1988), CadSimu (CADSIMU, 2004), Matlab (MATH, 1994) e o PSIM (PSIM, 1994). Dentre esses programas, optou-se pelo PSIM devido a facilidade de operação com a montagem dos circuitos, o retorno com as simulações propriamente ditas e por ser um software que pode ser baixado na versão demonstração, no site do desenvolvedor.

Para versões mais avançadas o software é pago, podendo chegar a onze mil reais.

Com base no catálogo técnico OHMINI e distribuidor exclusivo POWERSIM, serão apresentadas a seguir informações mais detalhadas sobre o software de simulação PSIM.

6.1 Descrição Geral

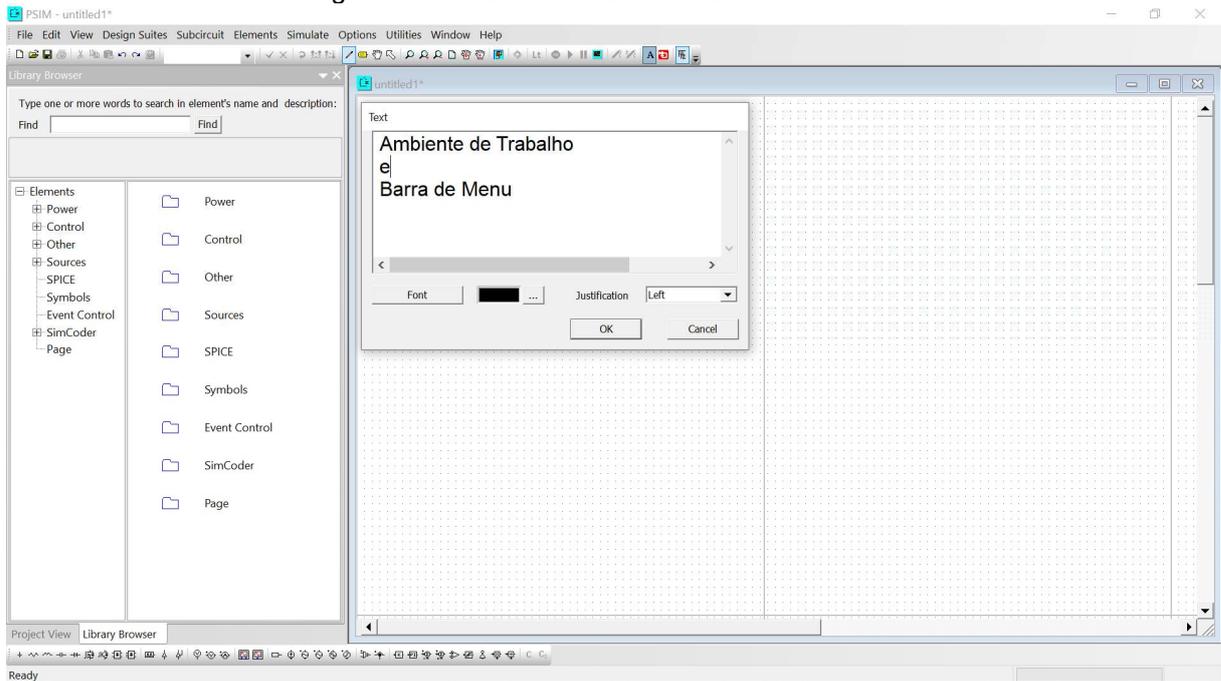
O PSIM é um software de simulação ideal para conversores e condicionadores de energia, acionamentos de máquinas elétricas, sistemas de energias renováveis e muitas outras aplicações em eletrônica de potência.

Demonstra ser um programa de alto desempenho com simulações rápidas e confiáveis sob medida para circuitos chaveados grandes e complexos, oferecendo um ambiente poderoso e eficiente para todas as necessidades em simulações de sistemas eletrônicos de potência e acionamentos.

6.2 Ambiente de Trabalho e Barra de Menu

Se faz necessário demonstrar a primeira tela quando se abre o software PSIM, a Figura 39 mostra o ambiente de trabalho e, na parte superior da tela a Barra de Menu: File, Edit, View, Design, Suites, Subcircuit, Elements Simule Options, Utilities Window Help.

Figura 39 - Ambiente de trabalho do software PSIM



Fonte: Elaboração própria.

6.3 Barra de Ferramentas

Na Figura 40 é apresentada a Barra de Ferramentas, que tem como principal função a construção dos circuitos, bem como suas simulações.

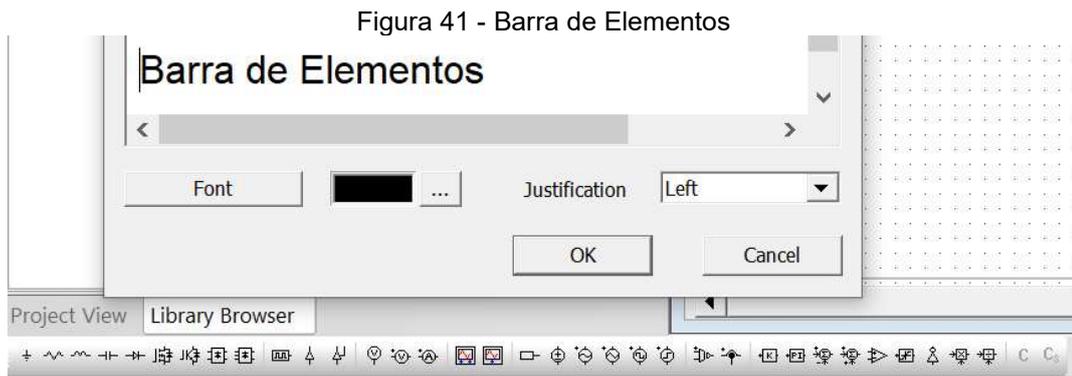
Figura 40 - Barra de Ferramentas



Fonte: Elaboração própria.

6.4 Barra de Elementos

A Barra de Elementos (Figura 41) fica situada bem na parte inferior do ambiente de trabalho, esses componentes e ferramentas são muito utilizados nas simulações, uma vez que são atalhos das ferramentas mais usadas que se encontram também inseridas na Barra de Ferramentas.



Fonte: Elaboração própria.

Componentes da barra de elementos

A tabela 5 que mostra os componentes que geralmente são utilizados nas simulações de circuitos. Estão localizados na barra de elementos:

Tabela 5 - Componentes da Barra de Elementos

Símbolo	Função	Símbolo	Função
	Terra (referência)		Fonte de tensão CC
	Resistor		Fonte de tensão senoidal
	Indutor		Fonte de tensão triangular
	Capacitor		Fonte de tensão quadrada
	Diodo		Fonte de degrau de tensão
	Tiristor		Sensor de tensão
	Interruptor (MOSFET)		Sensor de corrente
	Interruptor (IGBT)		Bloco de ganho proporcional
	Ponte Monofásica de Diodos		Controlador proporcional integrador
	Ponte Trifásicas de Diodos		Subtrator
	Gerador de clock para interruptores		Somador
	Controle liga/desliga para interruptores		Comparador
	Voltímetro (em relação ao terra)		Limitador
	Voltímetro diferencial		Porta inversora (NOT)
	Amperímetro		Multiplicador
	Osciloscópio de 2 canais		Divisor
	Osciloscópio de 1 canal		

Fonte: Elaboração própria.

7 SIMULAÇÃO

7.1 Montagem do Circuito

Antes de realizar a simulação, primeiramente se faz necessária a montagem do circuito o qual pretende simular e, para isso devem-se utilizar os componentes disponíveis na Barra de Elementos.

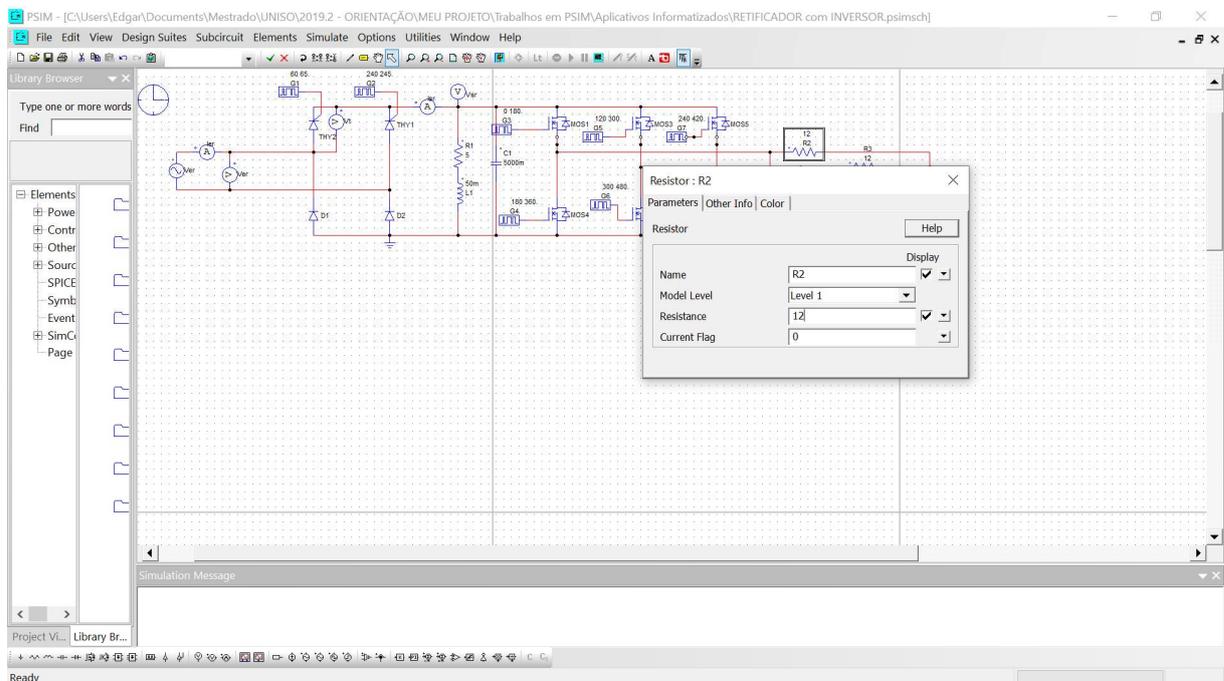
Durante a montagem do circuito os componentes deverão estar perfeitamente conectados, pois caso contrário poderá ocorrer falha na simulação.

7.1.1 Alterações de parâmetros dos componentes

O programa PSIM permite alteração dos parâmetros dos componentes, basta dar um duplo clique sobre o componente para alterar seus parâmetros.

Antes de executar a simulação, é necessário analisar e/ou modificar os parâmetros dos componentes utilizados, os quais podem ser vistos com um clique duplo sobre o componente em questão, como por exemplo para o caso do resistor destacado na Figura 42.

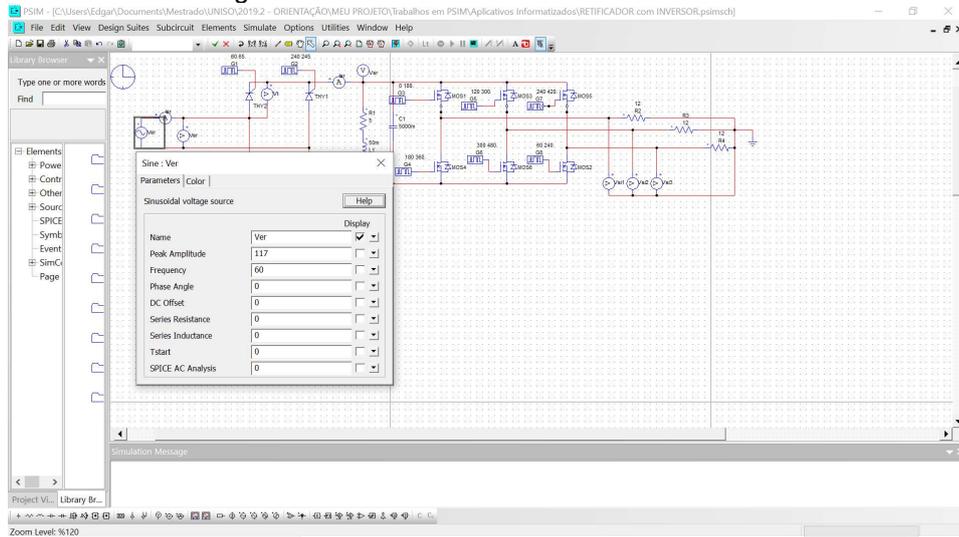
Figura 42 - Parâmetros do resistor



Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma que foi realizado com o resistor, dando duplo clique sobre a fonte de tensão CA é possível configurá-la conforme a necessidade do projeto (Figura 43).

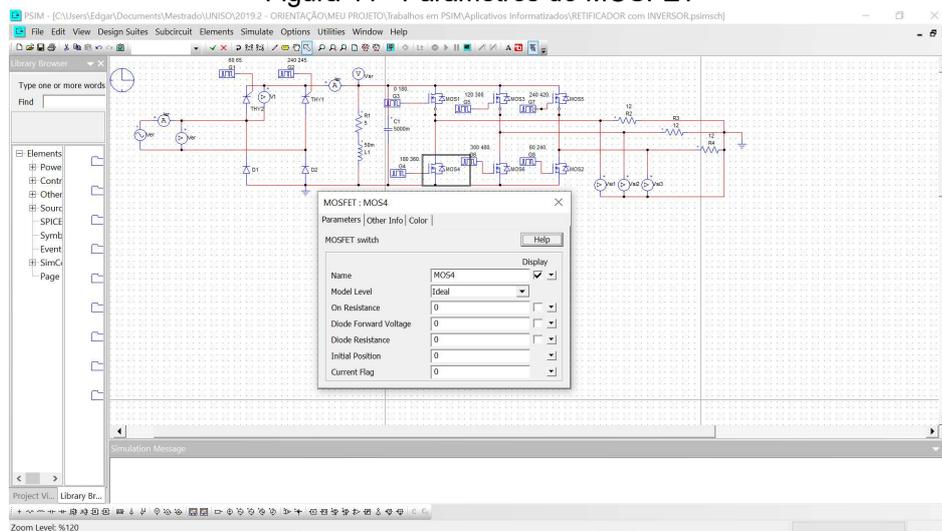
Figura 43 - Parâmetros da fonte de tensão CA



Fonte: Elaboração própria.

Com um duplo clique sobre o interruptor MOSFET, surgirá uma janela na qual podem-se realizar as alterações de parâmetros de acordo com a necessidade do projeto (Figura 44).

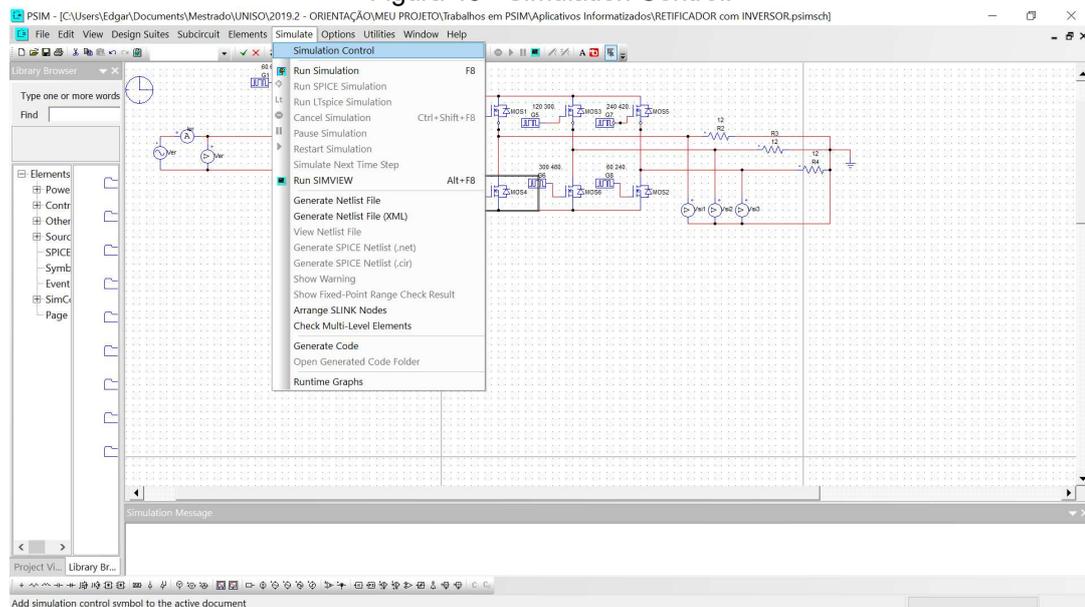
Figura 44 - Parâmetros do MOSFET



Fonte: Elaboração própria.

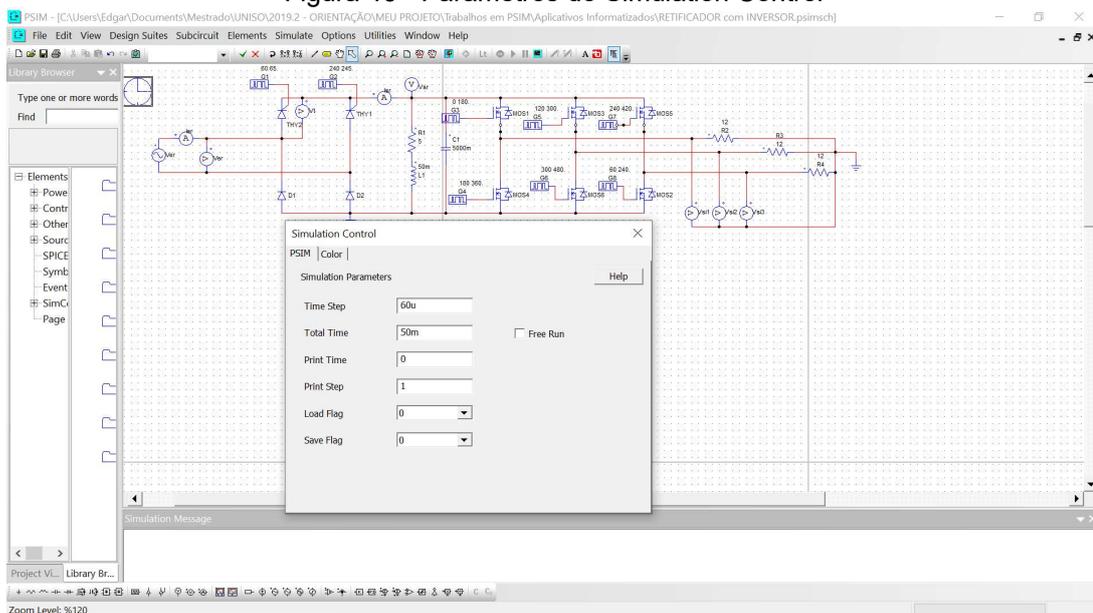
Realizadas as alterações de parâmetros ajustando os valores dos componentes, será necessário inserir os voltímetros e amperímetros nos pontos que se deseja realizar as medições e simulações. Deve ser adicionado também o Simulation Control na área Simulation de trabalho. Dando um duplo clique em Simulate abrirá uma janela conforme mostrada na Figura 45, onde poderão ser realizados os ajustes de parâmetro Figura 46.

Figura 45 - Simulation Control.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 - Parâmetros do Simulation Control

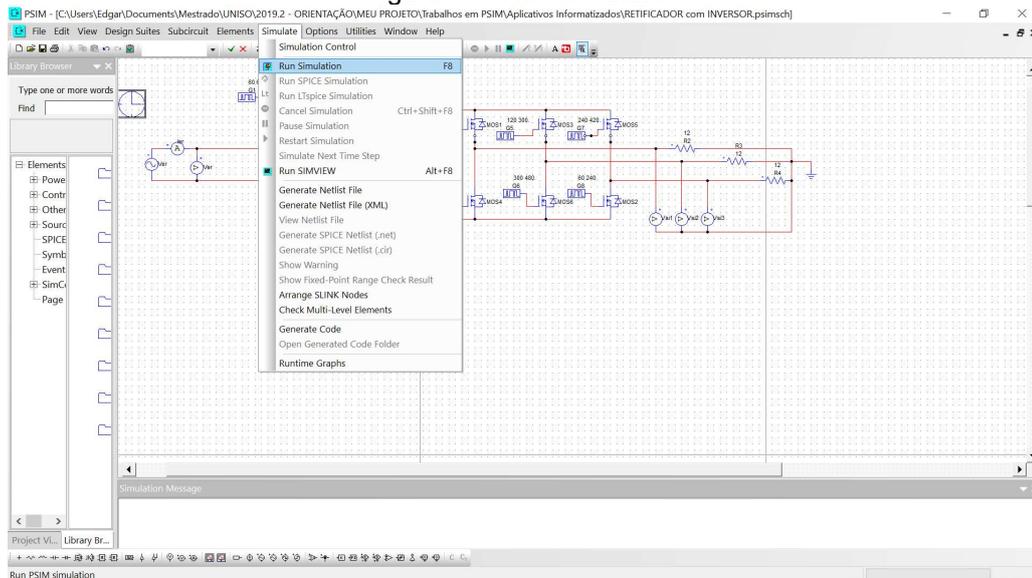


Fonte: Elaboração própria.

7.2 SIMVIEW

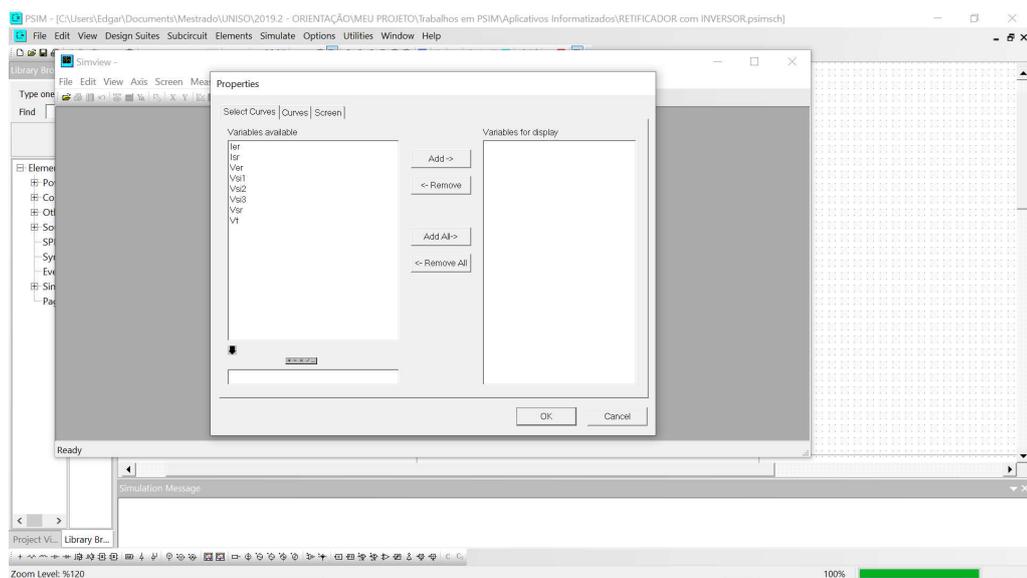
Clicando em Run Simulation como mostrado na Figura 47, a simulação será gerada e abrirá a janela do Simview conforme Figura 48, onde poderão ser realizados os ajustes de parâmetros para a simulação.

Figura 47 - Run Simulation



Fonte: Elaboração própria.

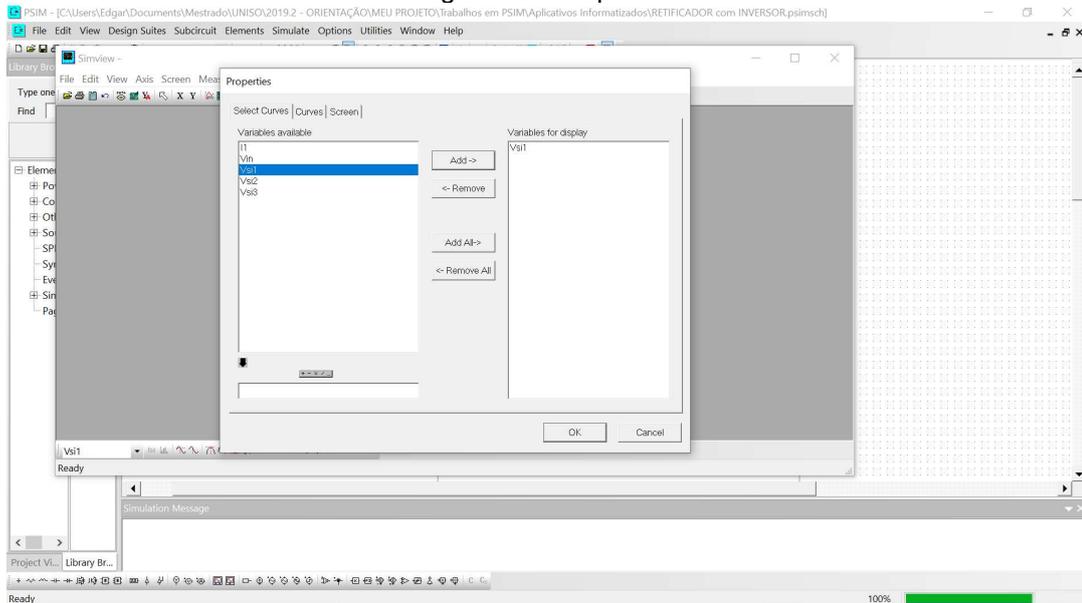
Figura 48 - Variáveis disponíveis na simulação



Fonte: Elaboração própria.

Após aberta a janela Properties como mostrado na Figura 49, caso queira analisar apenas uma variável, marca-se a variável desejada e clica-se em Add que será adicionado no lado direito, após clicar em Ok.

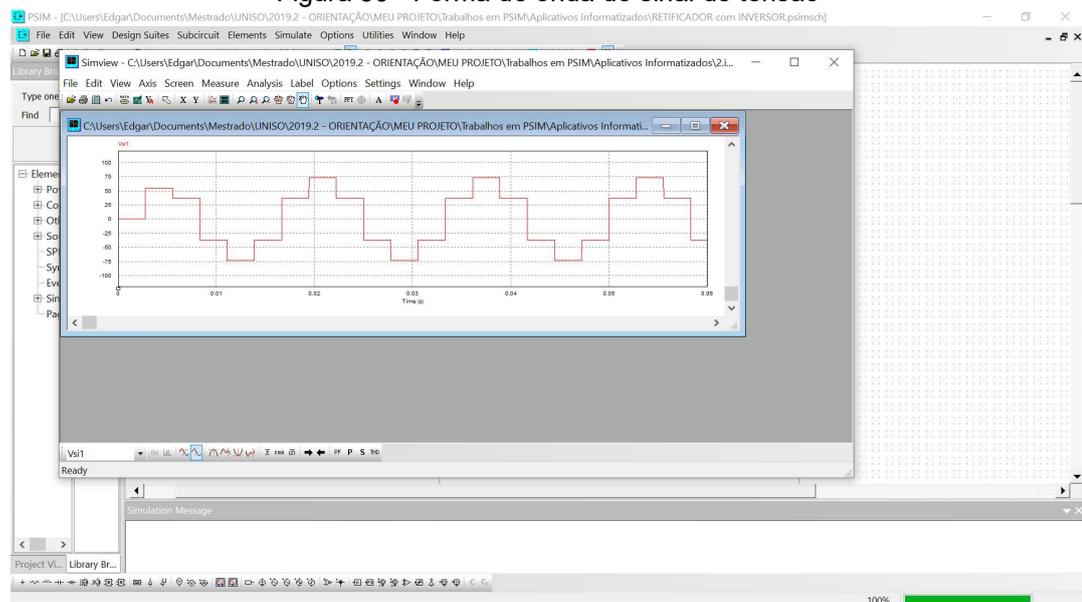
Figura 49 - Properties



Fonte: Elaboração própria.

Abrirá então a forma de onda conforme a Figura 50 – Forma de onda do sinal de tensão de tensão

Figura 50 - Forma de onda do sinal de tensão



Fonte: Elaboração própria.

Será útil a barra de medição que está localizada na parte inferior do Simview para analisar as formas de onda, conforme mostrada na Figura 50.

A tabela 6 são apresentadas os símbolos e funções que são úteis na elaboração do projeto, é através delas que os projetistas realizam as medições e coletam os resultados de forma rápida dos parâmetros desejáveis.

Tabela 6 - Símbolos e funções da Barra de medição

Símbolo	Função	Símbolo	Função
	Alterar entre barras de medição apenas verticais ou verticais e horizontais		Calcular a média dos valores absolutos da variável
	Mostrar valor máximo global		Ir para um ponto sucessivo
	Mostrar valor máximo mais próximo		Voltar para um ponto anterior
	Mostrar valor mínimo global		Calcular o valor de potência
	Mostrar valor mínimo mais próximo		Calcular a potência ativa (W)
	Calcular valor médio variável		Calcular a potência aparente (VA)
	Calcular valor eficaz da variável		Calcular índice de distorção harmônica

Fonte: Elaboração própria.

Na parte superior do Simview, existe a barra de ferramentas, que é mostrada na Figura 45.

A tabela 7 são apresentados os símbolos e funções que auxilia o projetista no momento da elaboração do projeto, são ferramentas que vão desde abrir um arquivo, alterar zoom, realizar movimento do gráfico à realizar a transformada rápida de Fourier da forma da onda, por exemplo.

Tabela 7 - Símbolos e funções da barra de ferramentas do Simview

Símbolo	Função	Símbolo	Função
	Abrir algum arquivo salvo		Aproximação por um fator de 10%
	Imprimir a forma de onda		Afastamento por um fator de 10%
	Copiar os gráficos da área de trabalho do Simview		Aproximação ou afastamento modificando os eixos x e y simultaneamente
	Desfazer alteração de move e zoom		Aproximação ou afastamento modificando um dos eixos e mantendo o outro constante
	Recarregar um arquivo		Realizar movimentação do gráfico
	Refazer os gráficos		Habilitar o modo medição
	Alterar entre modo de zoom e medição		Mostrar os valores das coordenadas (X,Y) de um ponto selecionado
	Alterar limites no eixo x		Realizar a transformada rápida de Fourier da forma da onda
	Alterar limites no eixo y		Mostrar o gráfico no domínio do tempo
	Adicionar ou remover curvas		Inserir um texto no gráfico
	Adicionar um novo gráfico		Salvar configurações temporárias
	Zoom selecionando uma área retangular no gráfico		Carregar configurações temporárias

Fonte: Elaboração própria.

8 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

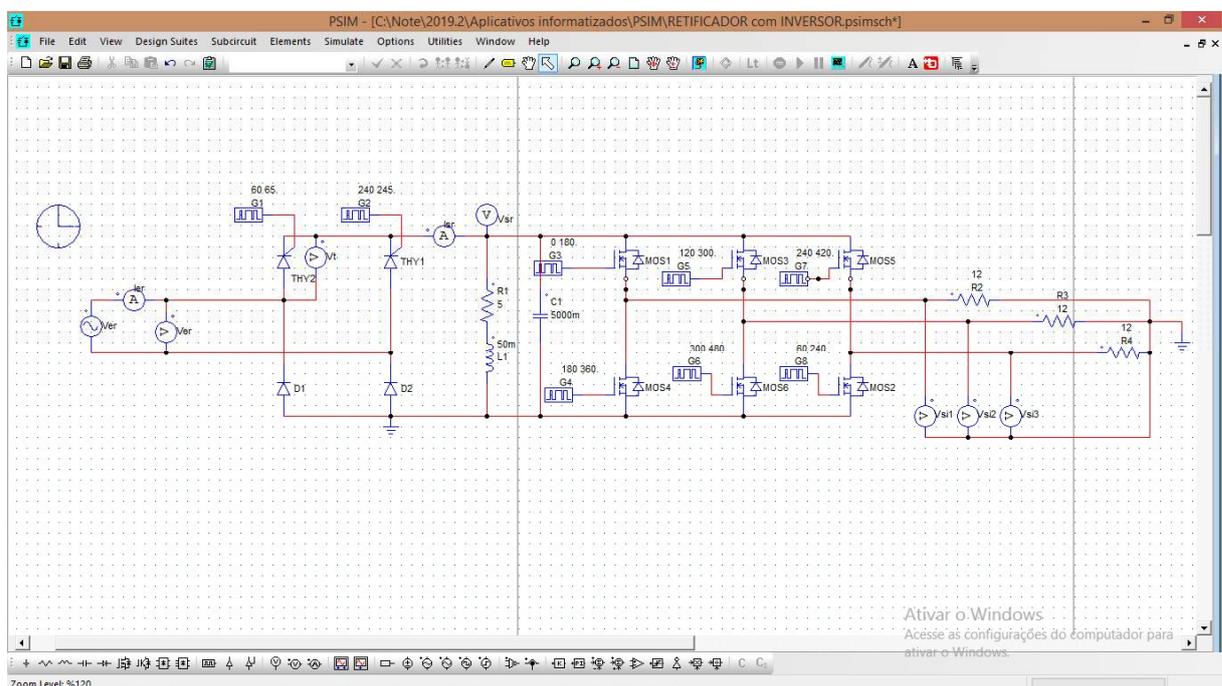
Nesta parte do trabalho apresentam-se os resultados das simulações para o projeto de um conversor monofásico - trifásico, tendo como estrutura básica as topologias apresentadas anteriormente.

O simulador utilizado foi o PSIM por ser um software de simulação fácil de ser operado, ser ideal em simulações de eletrônica de potência e em especial os conversores e possui um alto desempenho.

Pelo fato de priorizarmos, os aspectos de simplicidade de operação, peso, volume, custo, robustez optou-se por desenvolver um estudo mais detalhado da ponte retificadora monofásica semicontrolada simétrica, e da unidade inversora trifásica tipo Fonte de Tensão.

Na Figura 51 está representado o circuito completo do conversor monofásico - trifásico proposto neste trabalho.

Figura 51 - Circuito completo do Conversor monofásico - trifásico



Fonte: Elaboração própria.

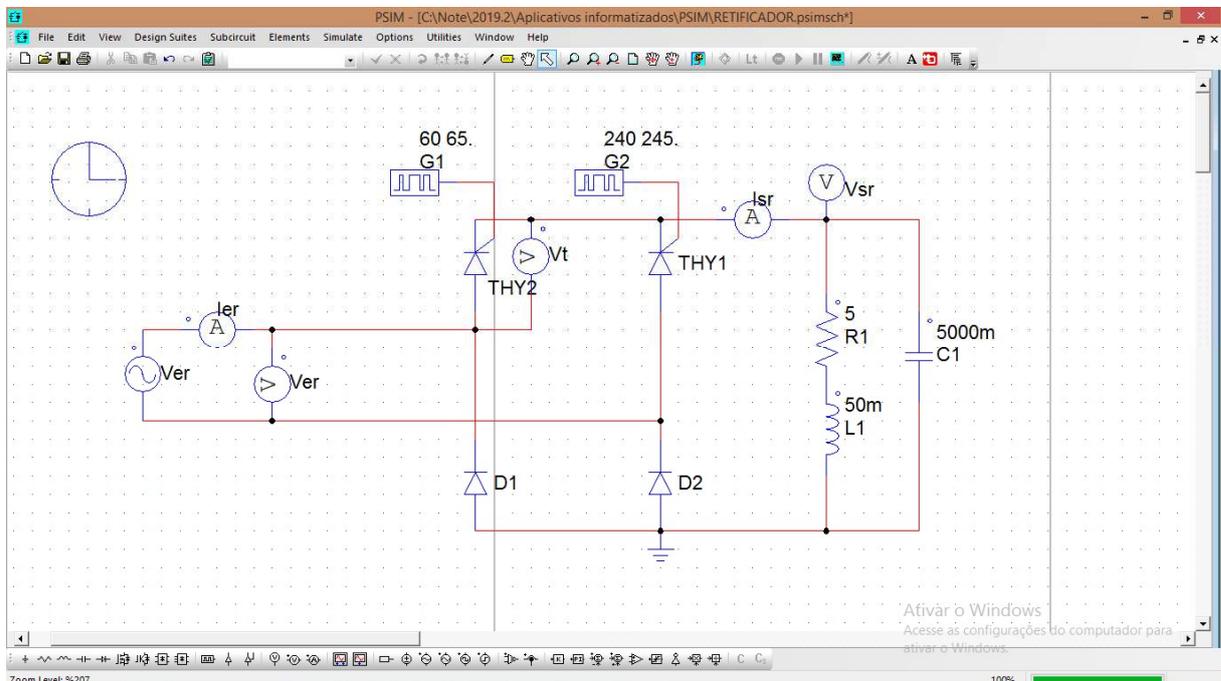
8.1 Simulação do Retificador Monofásico

Para melhor entendimento, é apresentado o conversor dividido em seus dois módulos básicos: Retificador Monofásico e Inversor Trifásico.

A Figura 52 mostra o lado da entrada do Conversor, o retificador monofásico que é o responsável pela retificação do sinal da corrente senoidal monofásica em sinal de corrente contínua, que será entregue na entrada do inversor.

Observe que utilizou-se como base a topologia da Ponte retificadora monofásica semicontrolada simétrica (Figura 9.b).

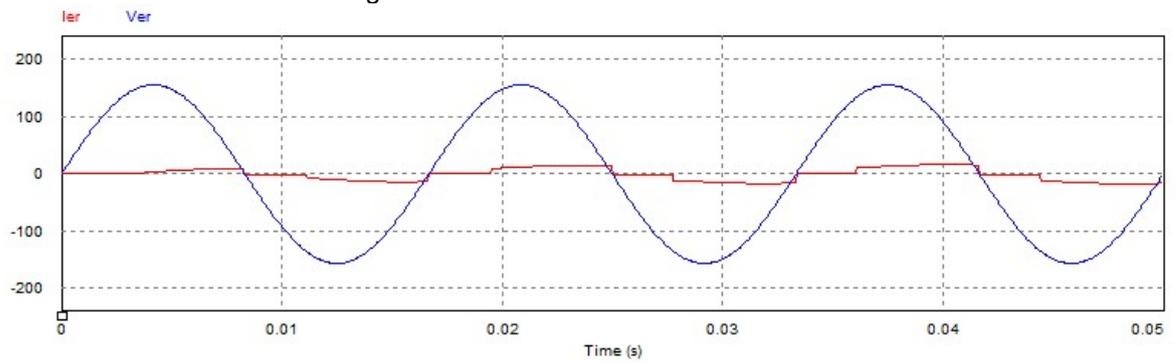
Figura 52 - Retificador Monofásico



Fonte: Elaboração própria.

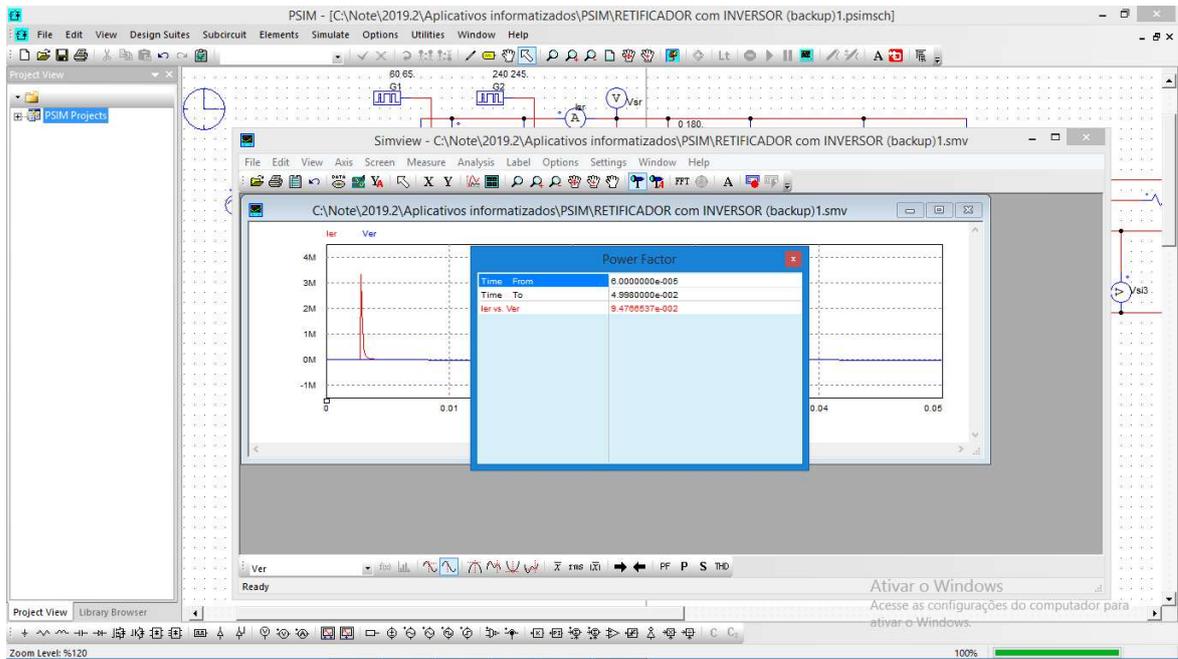
Na Figura 53 estão representadas as formas de onda da tensão e da corrente de entrada. Pode-se notar que a corrente está em fase com a tensão e possui baixo conteúdo harmônico. O fator de potência obtido foi de 0,947 (Figura 54) com uma taxa de distorção harmônica de 8,5 % (Figura 55) na corrente de entrada. Verifica-se que a corrente de entrada apresenta pequenas distorções nas passagens por zero das correntes. Estas distorções são causadas pelo baixo valor presente na referência de corrente quando acontece o cruzamento por zero, levando a uma limitação na taxa de crescimento da corrente.

Figura 53 - Tensão e corrente de entrada



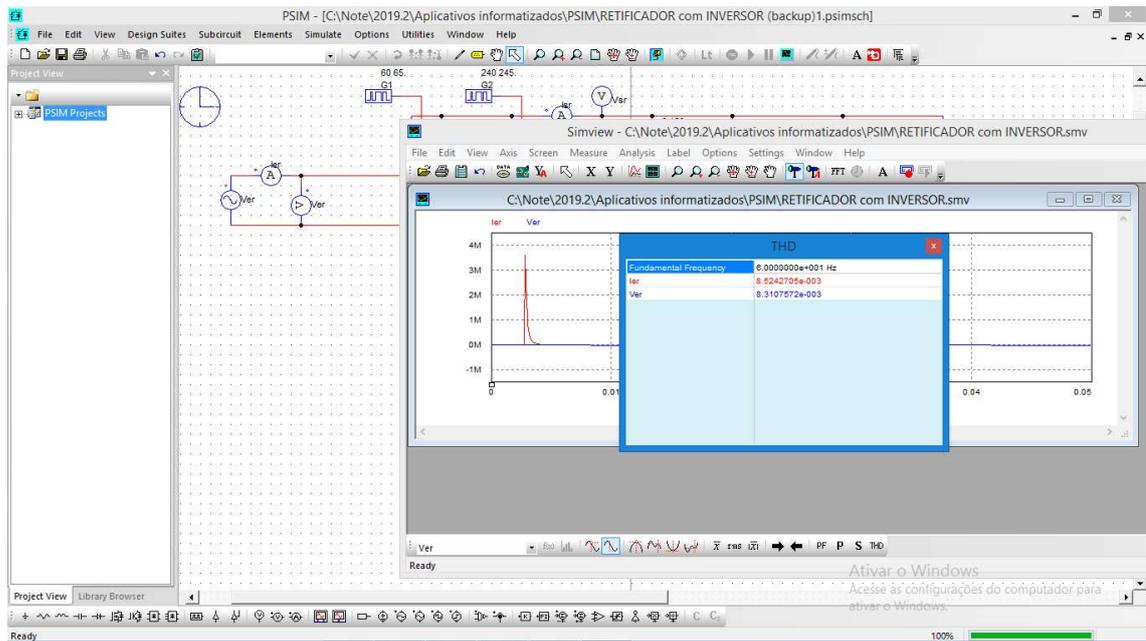
Fonte: Elaboração própria.

Figura 54 - Fator de Potência



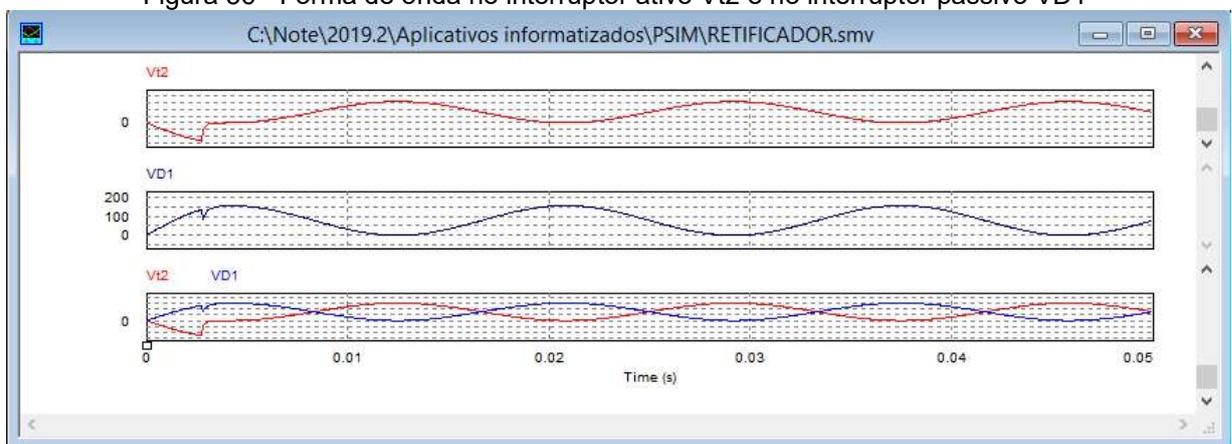
Fonte: Elaboração própria.

Figura 55 - Taxa de Distorção Harmônica



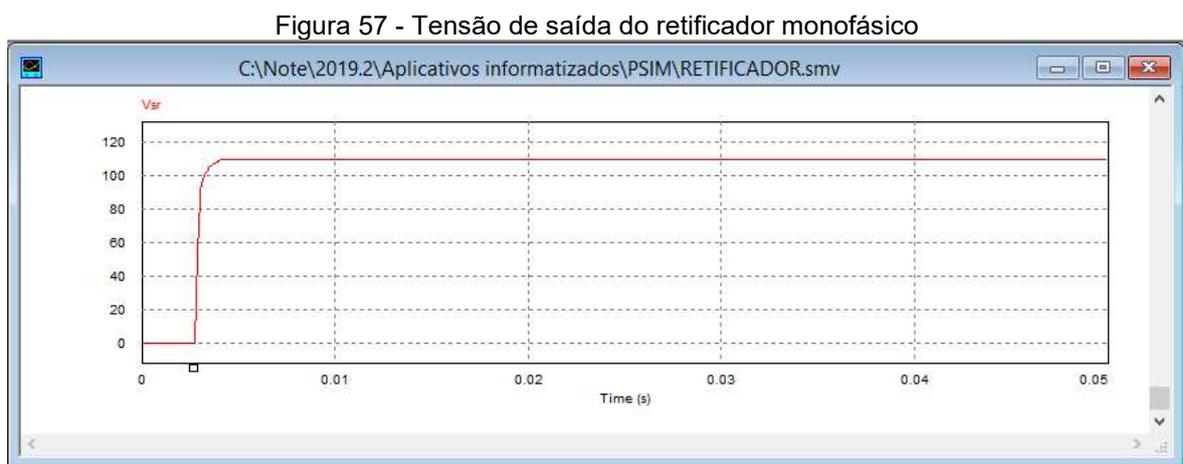
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 56 mostra a forma de onda no interruptor ativo $Vt2$ e no interruptor passivo $VD1$. A forma de onda no interruptor $Vt2$ representa o funcionamento para o semiciclo negativo da tensão de entrada e no interruptor $VD1$ para o semiciclo positivo da tensão de entrada. No semiciclo positivo os interruptores $Vt2$ e $VD1$ comutam entre si. No semiciclo negativo são os interruptores $Vt1$ e $VD2$ que comutam entre si.

Figura 56 - Forma de onda no interruptor ativo $Vt2$ e no interruptor passivo $VD1$ 

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 57 mostra a tensão de saída do retificador que será entregue ao inversor. Como esperado se encontra não mais na forma senoidal e sim um sinal na forma contínua. As características deste sinal são essenciais para o sucesso ou fracasso do projeto proposto neste Trabalho. Pois, como dito anteriormente, o conversor deste projeto é composto por um retificador (que transforma a onda senoidal monofásica em um sinal contínuo), caso o retificador proposto não faça sua parte de converter a onda senoidal em sinal contínuo, o restante do projeto fica fadado ao fracasso, pois a outra parte do projeto, o inversor, deve receber na entrada o sinal completamente contínuo para então convertê-lo em sinal senoidal novamente, porém não mais monofásico e sim trifásico na saída, para entregar à carga. Conforme pôde-se constatar no simulador, o sinal levou um tempo de 2,7 ms para se estabilizar, ou seja, levou apenas 16,1% do tempo total de um ciclo completo de onda senoidal, praticamente imperceptível pois, um ciclo completo leva em torno de 16,7ms, entre sair da inércia, atingir o valor de máximo positivo, retornar ao valor zero, atingir o valor máximo negativo e encerrar o ciclo novamente no valor zero, são 4 (quatro períodos), ou seja, cada período leva 25% do tempo então, neste projeto o sinal levou apenas 16,1% do tempo total do ciclo, ou seja, o sinal estava saindo da inércia e indo para o valor máximo.



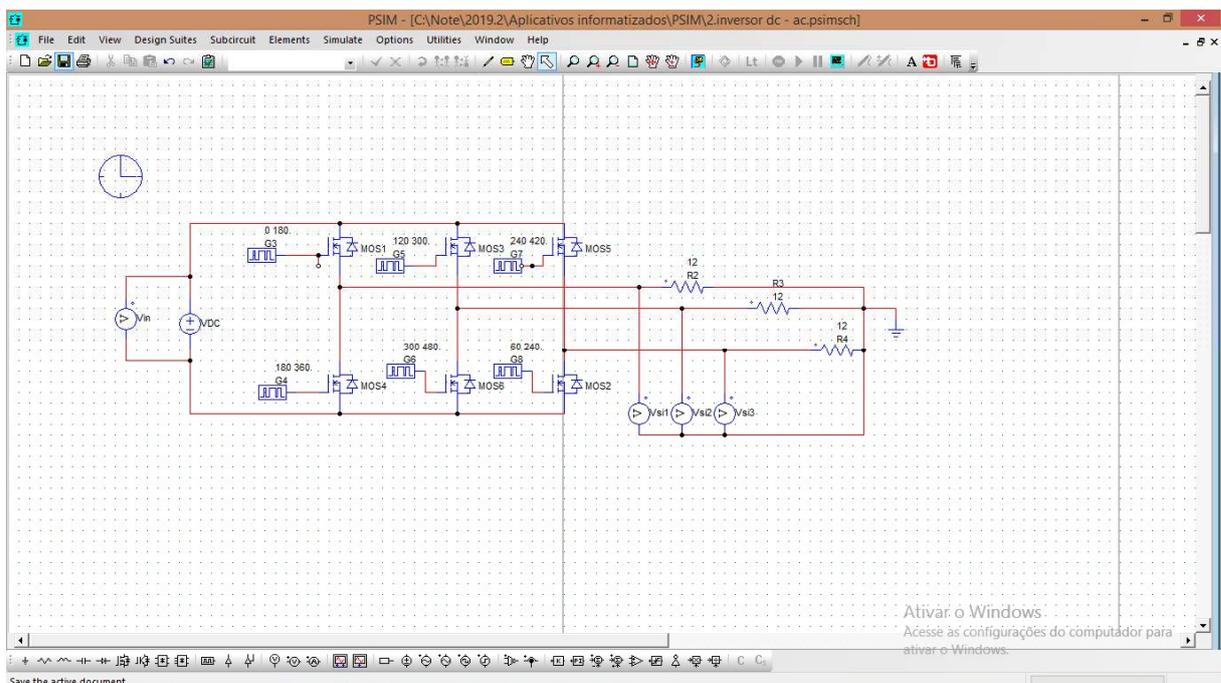
Fonte: Elaboração própria.

8.2 Simulação do Inversor Trifásico

A Figura 58 apresenta o lado da saída do Conversor, o inversor trifásico que é o responsável pela inversão do sinal da corrente contínua em três sinais de corrente alternada defasadas em 120° entre si, ou seja, V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} , que será entregue à carga.

Observe que foi utilizado como base para este trabalho a topologia do Inversor Trifásico tipo Fonte de Tensão (Figura 13). Essa escolha se deu pelo mesmo motivo apresentada na parte do circuito de entrada, ou seja, para priorizar os aspectos de simplicidade de operação, peso, volume, custo, robustez e em virtude da aplicação no meio rural, ocorrer muitas vezes em locais distantes de assistência técnica qualificada.

Figura 58 - Inversor Trifásico

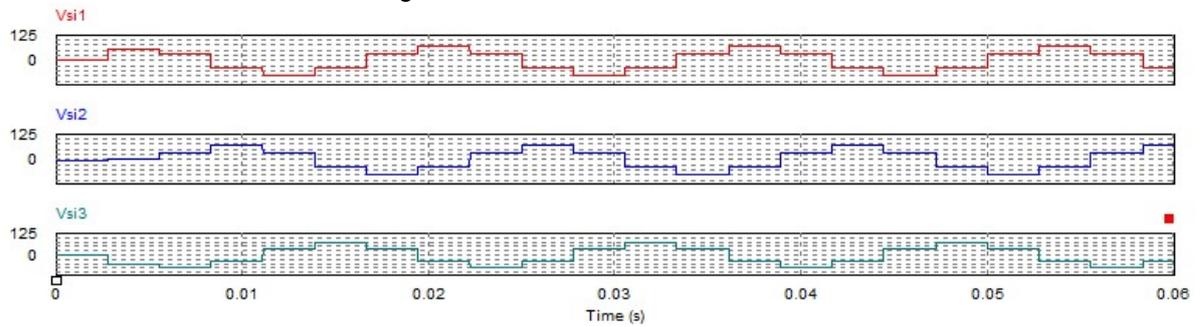


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 58 apresenta a estrutura básica de um inversor fonte de tensão para uma conexão trifásica. Os diodos presentes no circuito garantem uma bidirecionalidade no sentido da corrente, necessária à correta operação do conversor.

A Figura 59 apresenta os sinais de saída do inversor

Figura 59 - Sinais de saída do inversor



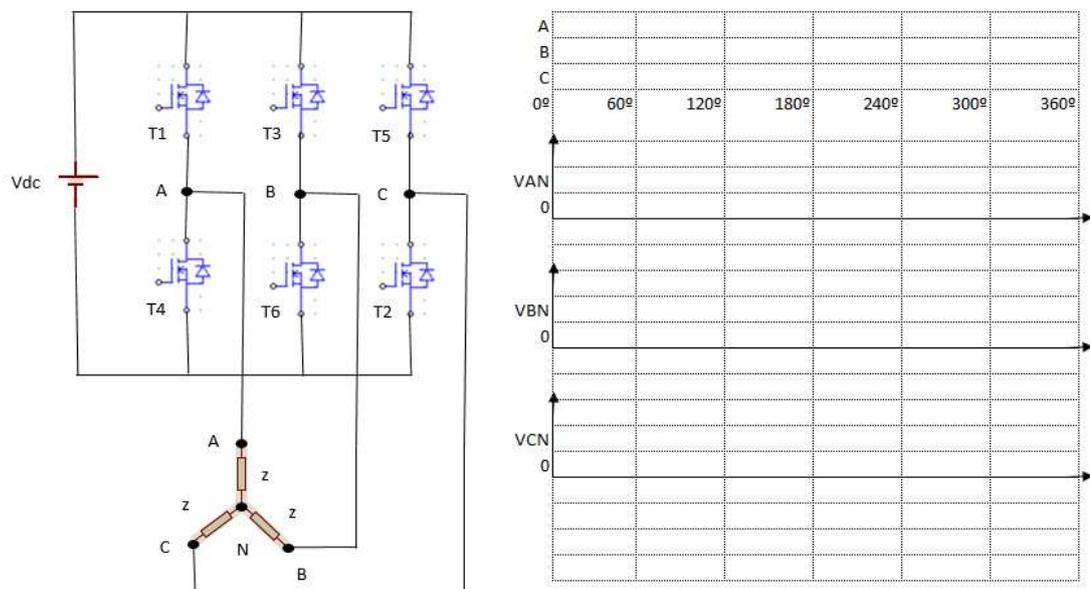
Fonte: Elaboração própria.

8.3 Formação da Onda Senoidal Modificada

É possível observar como o inversor foi capaz de transformar a tensão contínua de origem do retificador em três fases senoidais modificadas defasadas em 120° uma da outra.

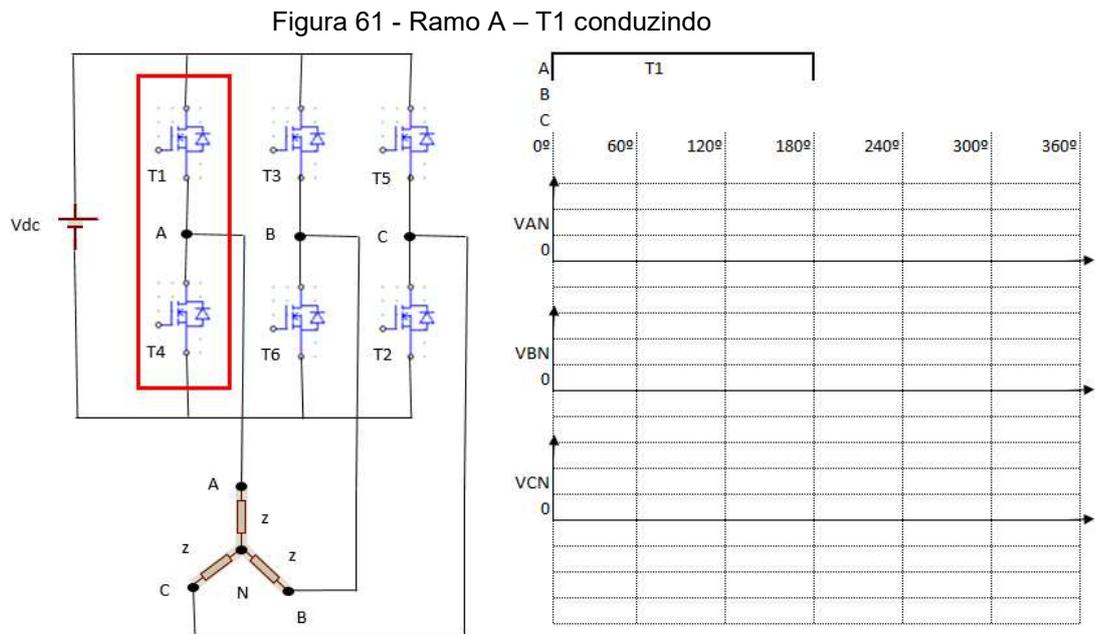
Para melhor entendimento, foi redesenhada a Figura 60 para explicar o passo-a-passo da formação da onda senoidal modificada.

Figura 60 - Inversor trifásico



Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode-se observar, na Figura 61, existem 3 ramos: A, B e C ligados em estrela com ponto comum o Neutro. A seguir demonstra-se como constituiu cada ramo.

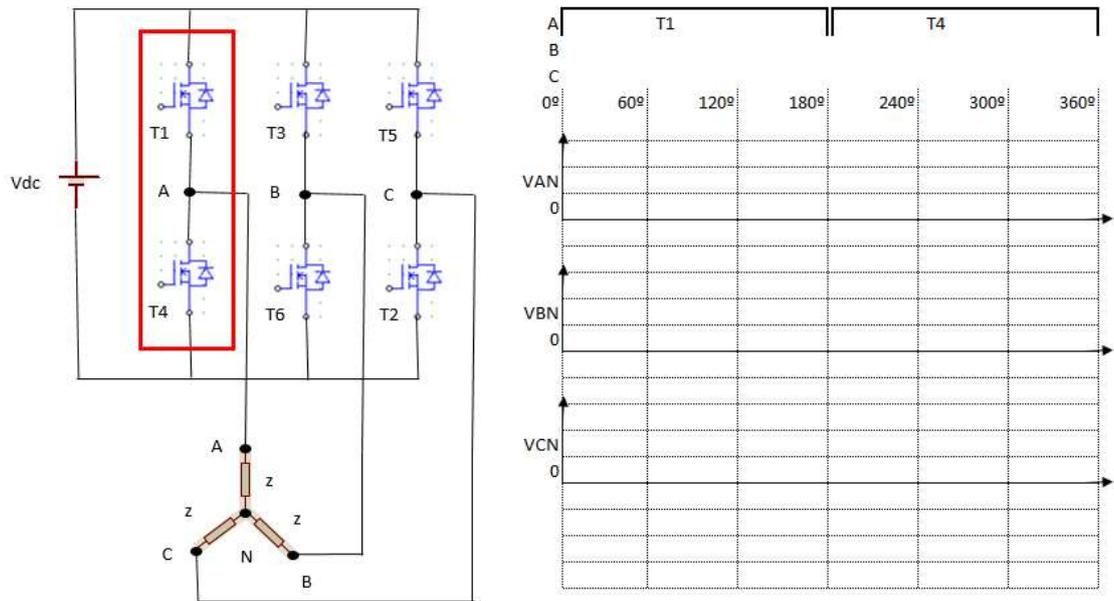


Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que o período de condução para cada chave é de 180° , de modo que duas chaves, no mesmo caminho, nunca estarão conduzindo de modo simultâneo. Desta forma, existem seis intervalos distintos de 60° para um ciclo de saída.

No ramo A, T1 irá conduzir 180° com início da condução em 0° encerrando a condução em 180° e T4 irá conduzir 180° com início da condução em 180° encerrando a condução em 360° , conforme podemos verificar abaixo na Figura 62.

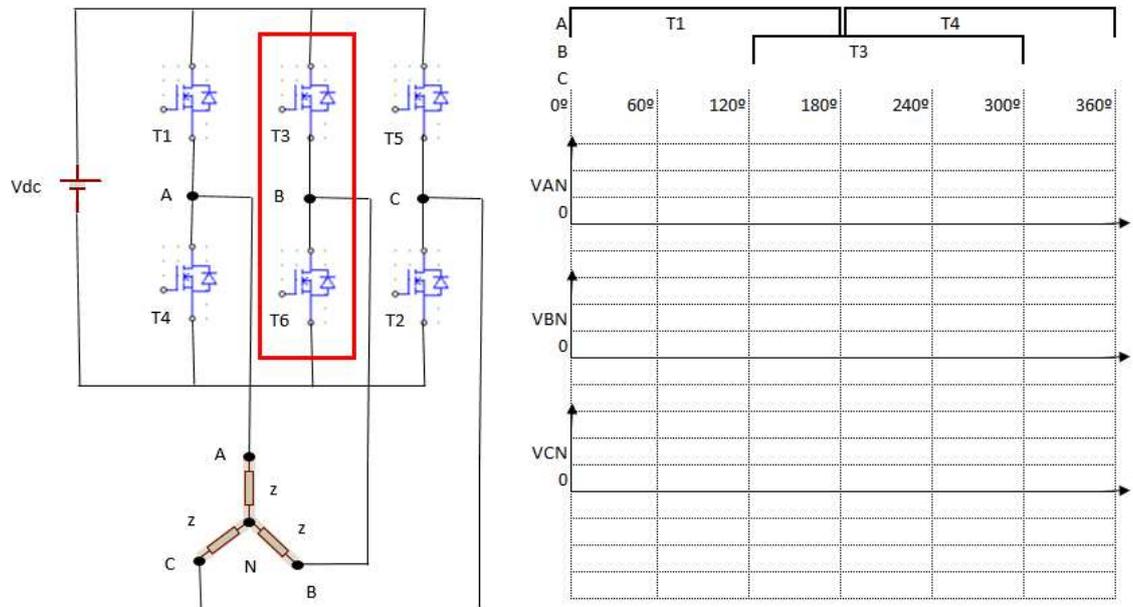
Figura 62 - Ramo A – T4 conduzindo



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 63 mostra o ramo B, que contém T3 e T6.

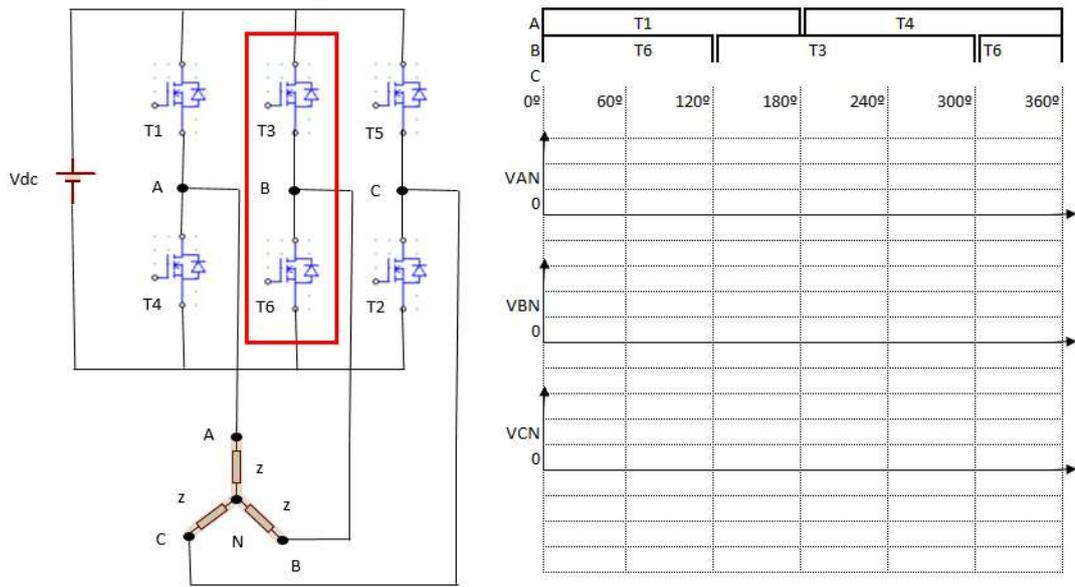
Figura 63 - Ramo B – T3 conduzindo



Fonte: Elaboração própria.

No ramo B, T3 irá conduzir 180° com início da condução em 120° encerrando a condução em 300° e T6 irá conduzir 180° com início da condução em 0° encerrando a condução em 120° e também irá com início da condução em 300° encerrando a condução em 360°, conforme pode-se verificar abaixo na Figura 64.

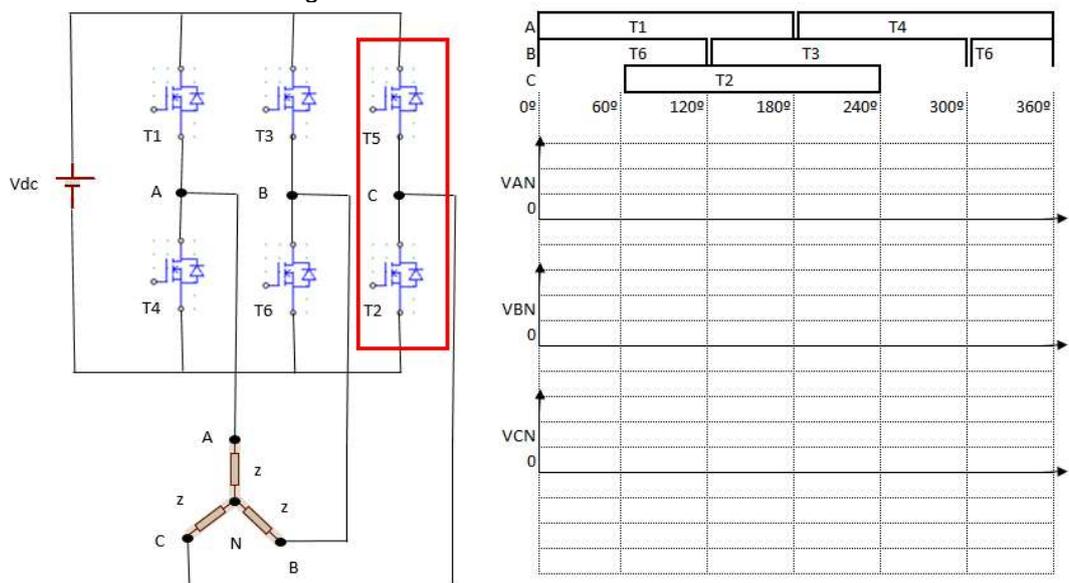
Figura 64 - Ramo B – T6 conduzindo



Fonte: Elaboração própria.

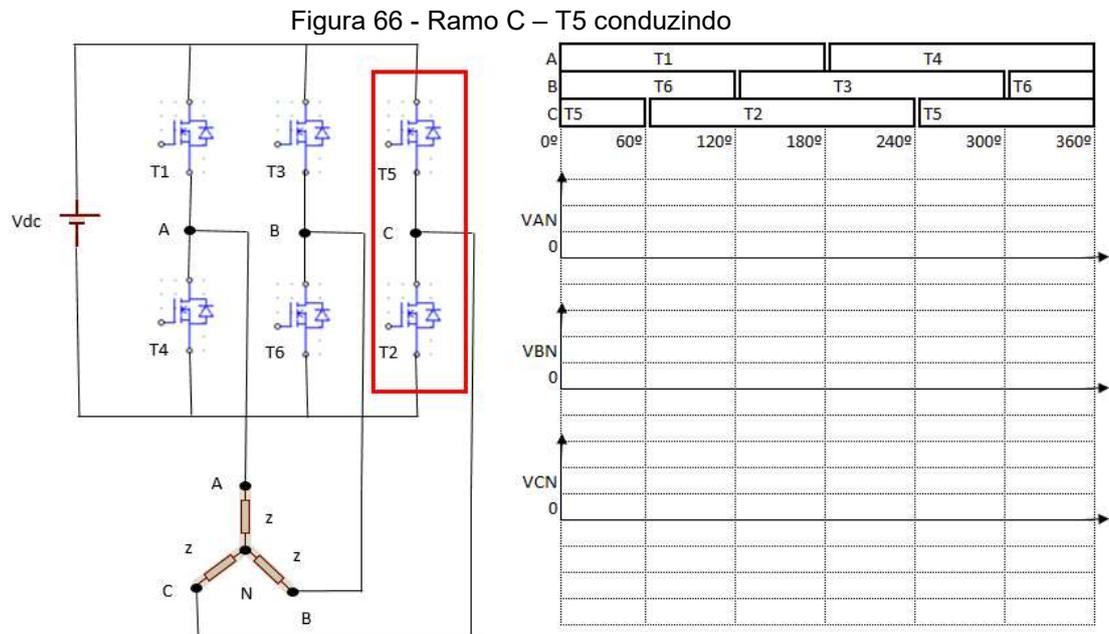
A Figura 65 mostra o ramo C, que contém T2 e T5.

Figura 65 - Ramo C – T2 conduzindo



Fonte: Elaboração própria.

No ramo C, T2 irá conduzir 180° com início da condução em 60° encerrando a condução em 240° e T5 irá conduzir 180° com início da condução em 0° encerrando a condução em 60° e também irá com início da condução em 240° encerrando a condução em 360° , conforme pode-se verificar na Figura 66.



Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 61 a 66, há a indicação de quais MOSFETs pertencem a cada ramo.

Os MOSFETs são representados pela letra T, a saber:

Ramo A: T1 e T4

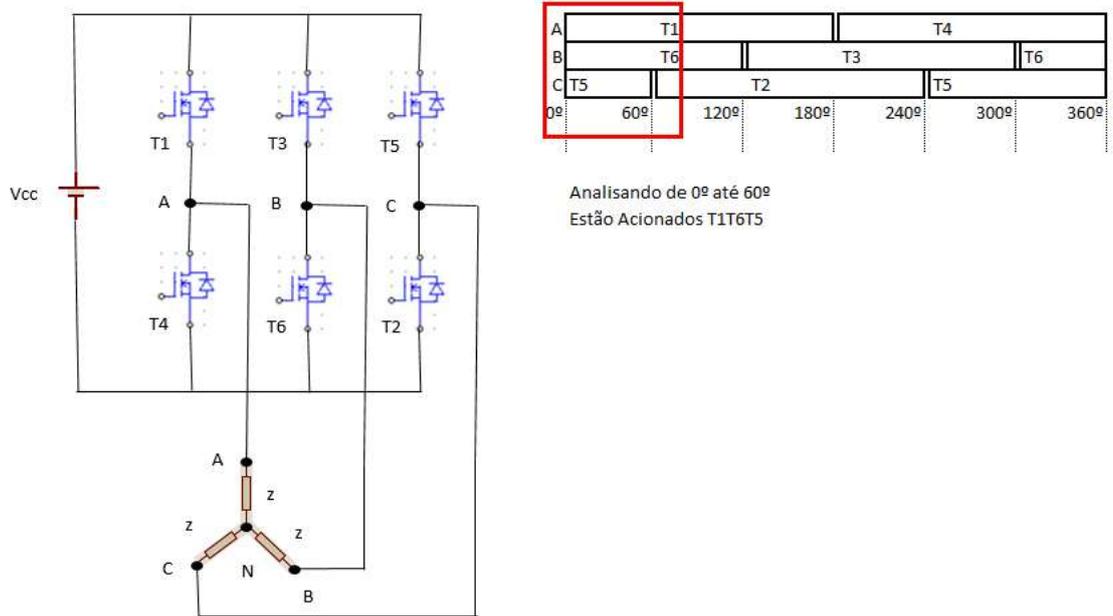
Ramo B: T3 e T6

Ramo C: T5 e T2

A seguir será verificado quais são as 03 chaves que estarão conduzindo simultaneamente.

Conforme mostrado na Figura 67, entre 0° e 60° estão conduzindo T1, T6 e T5:

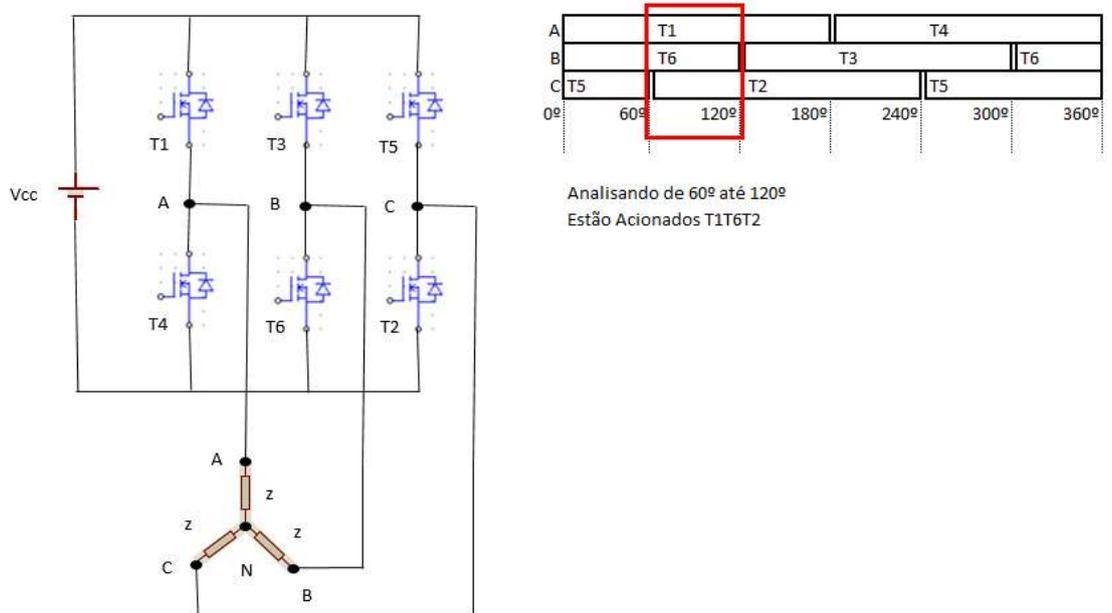
Figura 67 - T1, T6 e T5 conduzindo entre 0° e 60°



Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar na Figura 68, entre 60° e 120° estão conduzindo T1, T6 e T2:

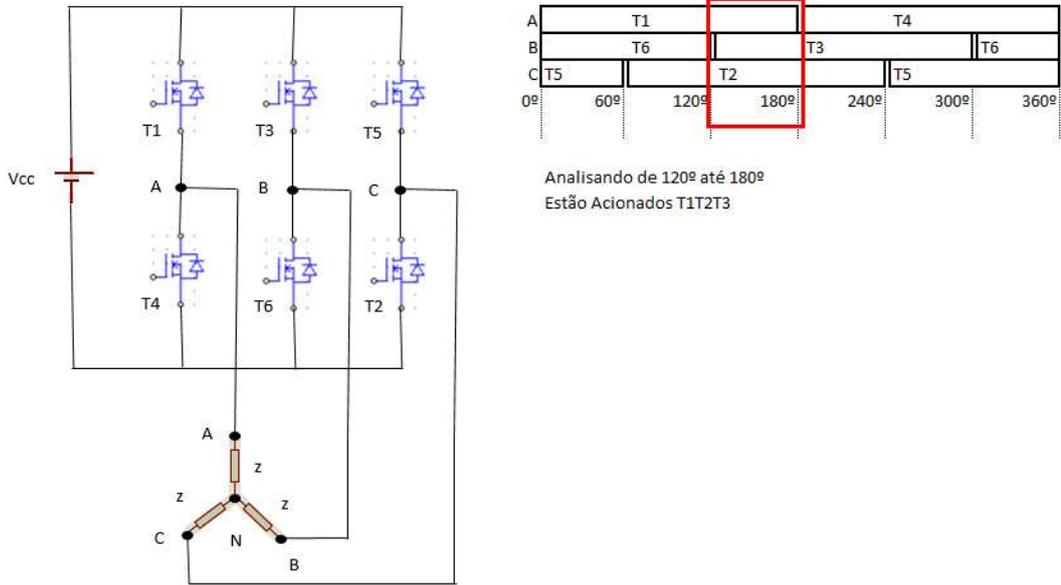
Figura 68 - T1, T6 e T2 conduzindo entre 60° e 120°



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 69, entre 120° e 180° estão conduzindo T1, T2 e T3:

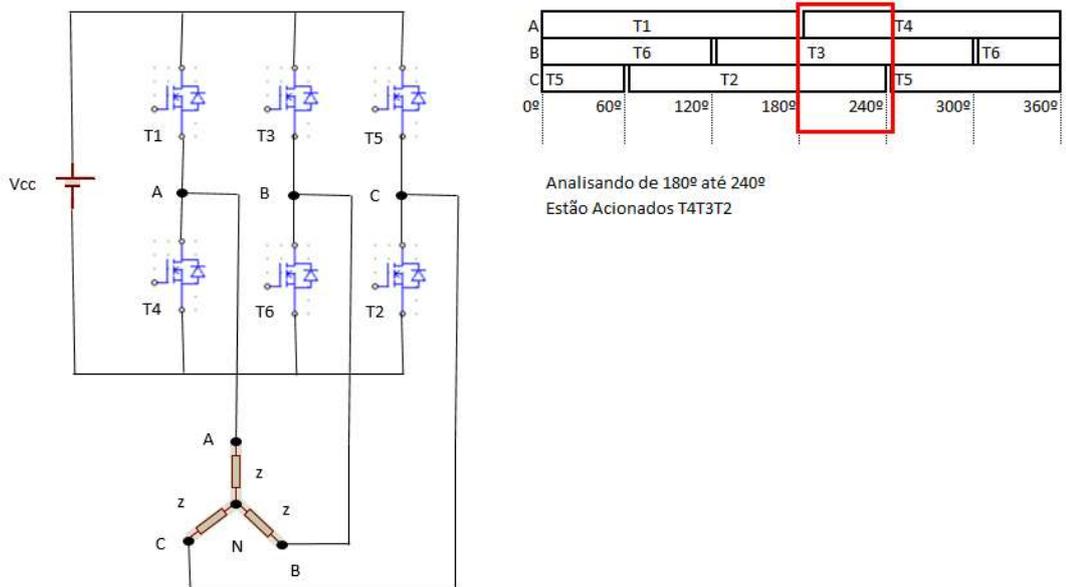
Figura 69 - T1, T2 e T3 conduzindo entre 120° e 180°



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 70, entre 180° e 240° estão conduzindo T4, T2 e T3:

Figura 70 - T4, T3 e T2 conduzindo entre 180° e 240°



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que nas Figuras 67 a 70 está indicado quais MOFETs estão adicionados a cada 160° de forma simultânea nos três ramos (A, B e C):

0° - 60°: T1 T6 T5

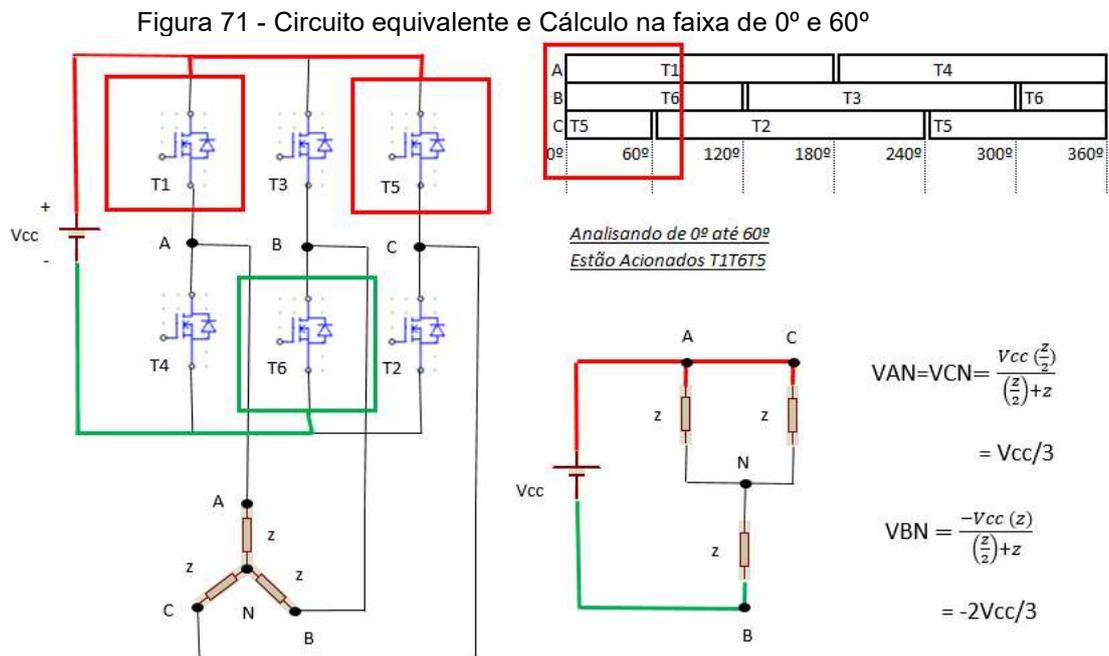
60° - 120°: T1 T6 T2

120° - 180°: T1 T2 T3

180° - 240°: T4 T3 T2

Agora que já se sabe quais são as 03 chaves que estão ligadas simultaneamente, pode-se extrair um circuito equivalente e a partir desse calcular a tensão entre VAN, VBN e VCN dentro de suas faixas de condução.

Na Figura 71 pode-se extrair um circuito equivalente e realizar o cálculo da tensão em VAN, VBN e VCN, na faixa de 0° e 60°. Encontra-se uma expressão através do divisor de tensão, que diz a forma de comportamento do circuito e consequentemente como formará a onda senoidal modificada.

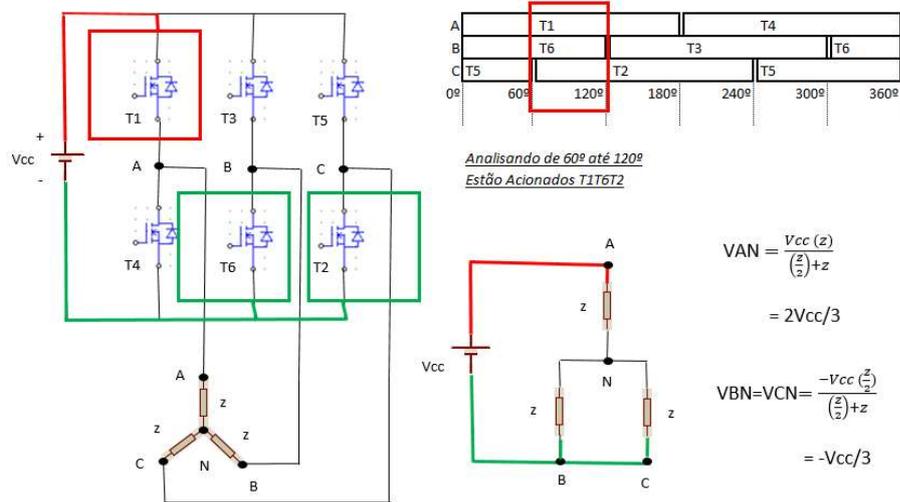


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 72 pode-se extrair um circuito equivalente e realizar o cálculo da tensão em VAN, VBN e VCN, na faixa de 60° e 120°. Encontra-se uma expressão

através do divisor de tensão, que diz a forma de comportamento do circuito e consequentemente como formará a onda senoidal modificada.

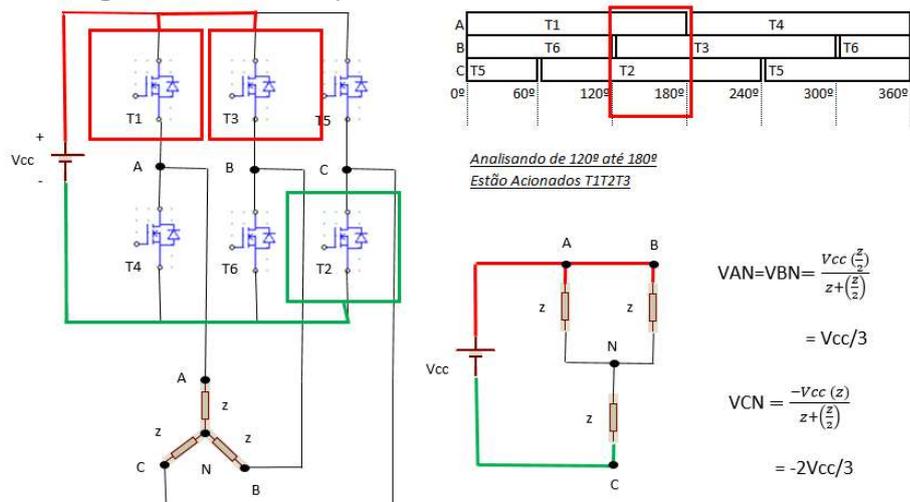
Figura 72 - Circuito equivalente e Cálculo na faixa de 60° e 120°



Fonte: Elaboração própria.

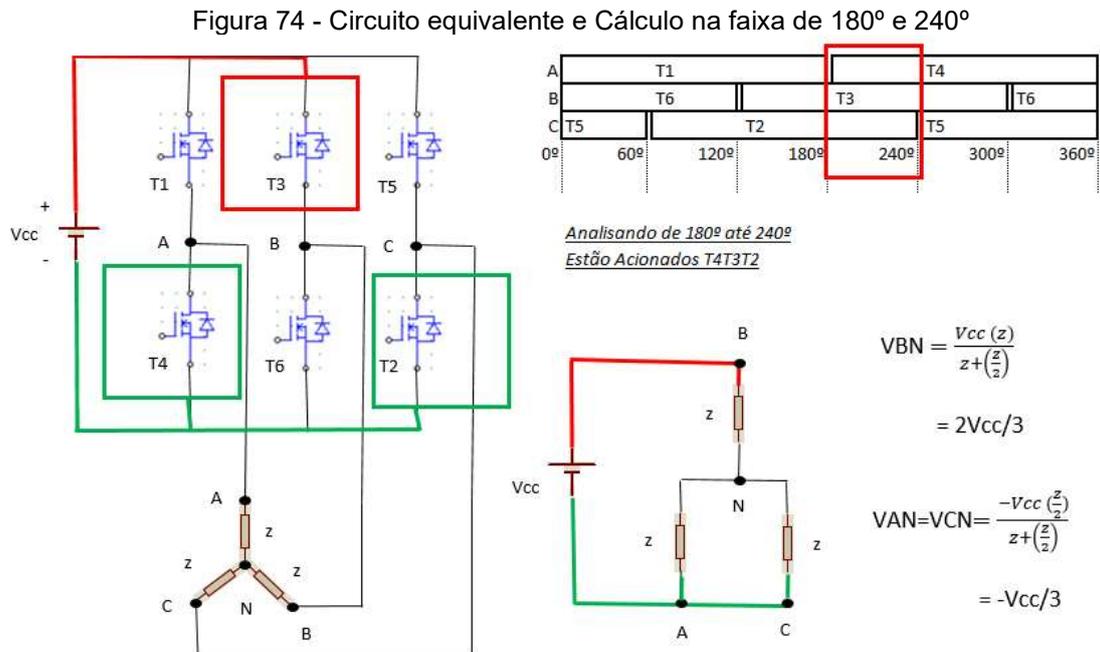
Na Figura 73 pode-se extrair um circuito equivalente e realizar o cálculo da tensão em VAN, VBN e VCN, na faixa de 120° e 180°. Encontra-se uma expressão através do divisor de tensão, que diz a forma de comportamento do circuito e consequentemente como formará a onda senoidal modificada.

Figura 73 - Circuito equivalente e Cálculo na faixa de 120° e 180°



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 74 pode-se extrair um circuito equivalente e realizar o cálculo da tensão em VAN, VBN e VCN, na faixa de 180° e 240°. Encontra-se uma expressão através do divisor de tensão, que diz a forma de comportamento do circuito e conseqüentemente como formará a onda senoidal modificada.

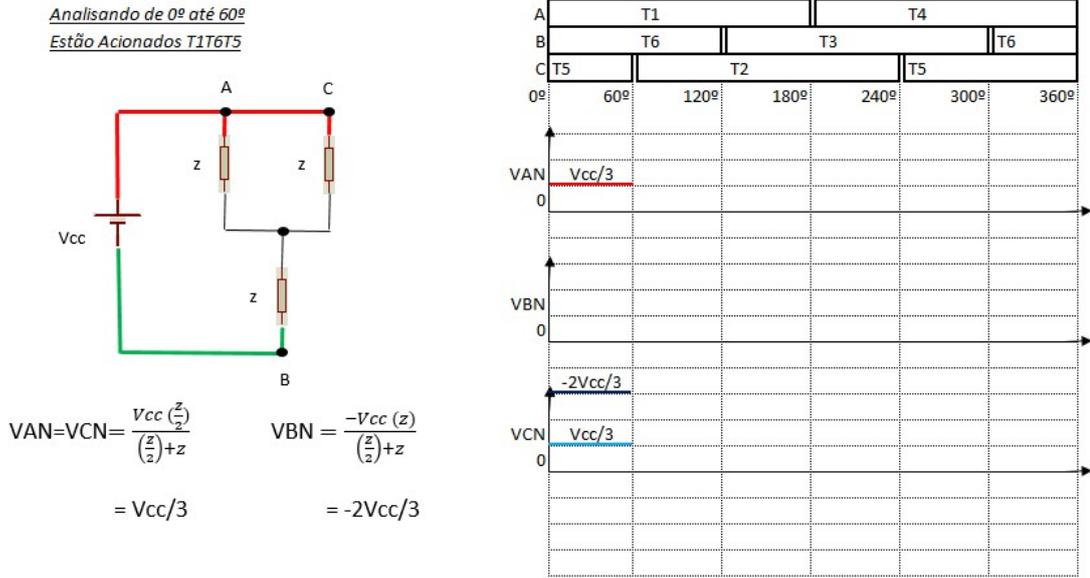


Fonte: Elaboração própria.

Após os cálculos de tensão realizados de 60° em 60° entre VAN, VBN e VCN, apresentados nas Figuras 71, 72, 73 e 74, onde pode-se observar o formato do gráfico, passa-se a montar o gráfico da onda senoidal modificada com base nos cálculos e suas devidas faixas.

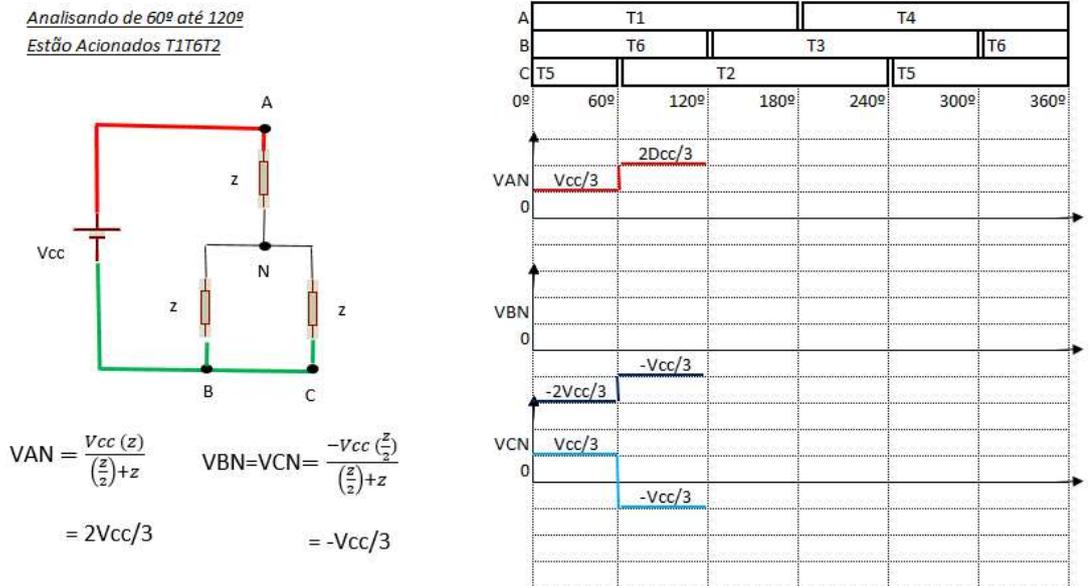
A partir de então, Figuras 75 a 79, com o uso dos resultados obtidos, observa-se que a cada 60° começa ser possível visualizar a onda senoidal modificada.

Figura 75 - Confeção de gráfico - 0° a 60°



Fonte: Elaboração própria.

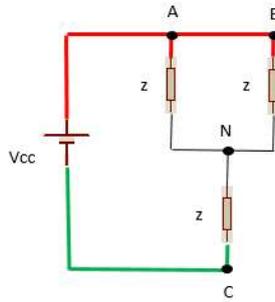
Figura 76 - Confeção de gráfico - 60° a 120°



Fonte: Elaboração própria.

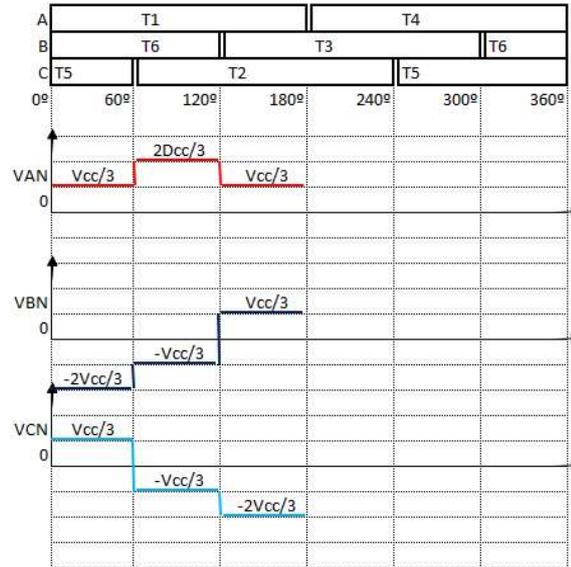
Figura 77 - Confeção de gráfico - 120° a 180°

Analisando de 120° até 180°
Estão Acionados T1T2T3



$$VAN = VBN = \frac{V_{cc} \left(\frac{z}{2}\right)}{z + \left(\frac{z}{2}\right)} = V_{cc}/3$$

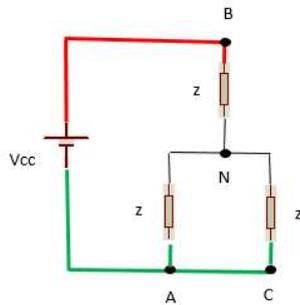
$$VCN = \frac{-V_{cc} (z)}{z + \left(\frac{z}{2}\right)} = -2V_{cc}/3$$



Fonte: Elaboração própria.

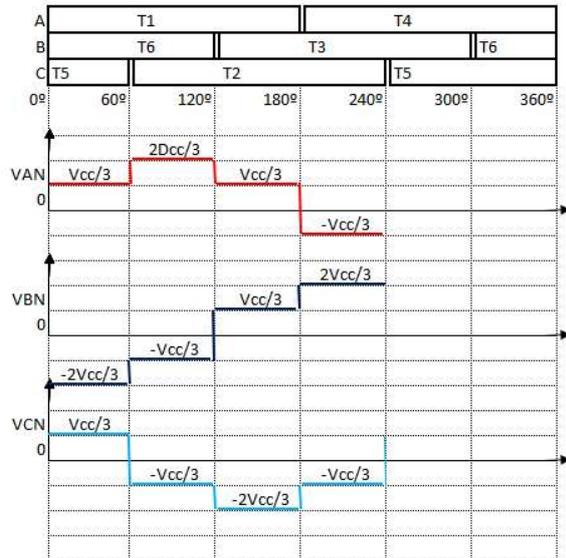
Figura 78 - Confeção de gráfico - 180° a 240°

Analisando de 180° até 240°
Estão Acionados T4T3T2



$$VBN = \frac{V_{cc} (z)}{z + \left(\frac{z}{2}\right)} = 2V_{cc}/3$$

$$VAN = VCN = \frac{-V_{cc} \left(\frac{z}{2}\right)}{z + \left(\frac{z}{2}\right)} = -V_{cc}/3$$

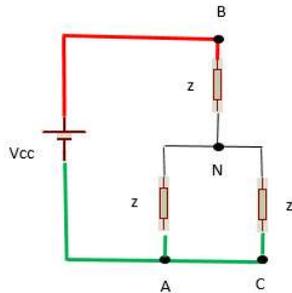


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 79, pode-se observar a onda senoidal modificada por completo.

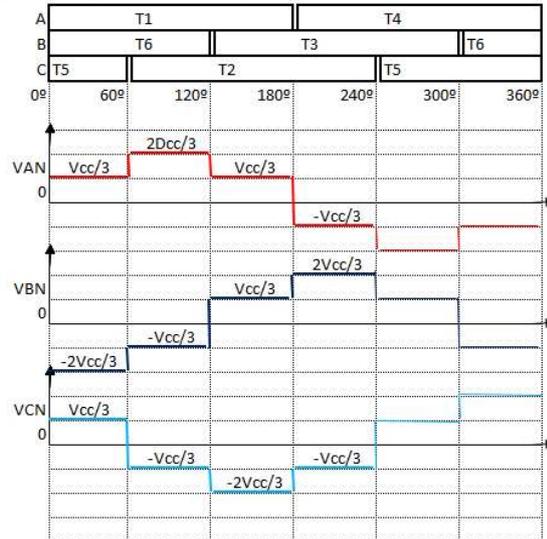
Figura 79 - Confeção do gráfico - completo

Analisando de 180° até 240°
 Estão Acionados T4T3T2



$$V_{BN} = \frac{V_{cc} (z)}{z + (\frac{z}{2})} = 2V_{cc}/3$$

$$V_{AN} = V_{CN} = \frac{-V_{cc} (\frac{z}{2})}{z + (\frac{z}{2})} = -V_{cc}/3$$



Fonte: Elaboração própria.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentadas e analisadas algumas topologias, sendo o principal objetivo destas topologias a conversão da onda senoidal monofásica em trifásica. Procurou-se nesta síntese apresentar as características básicas de funcionamento atendendo aos requisitos de funcionalidade, eficiência confiabilidade, que apresente um bom desempenho e seja aplicável para fazer a ligação de um motor de indução do tipo trifásico.

A estrutura apresentada foi do tipo meia ponte, a qual possui apenas dois interruptores ativos e dois diodos. Entretanto, esse tipo de estrutura não oferece bidirecionalidade no fluxo de energia, e também não permite o controle ativo para que o formato da corrente de entrada possa ser senoidal. Também foi apresentada a estrutura meia ponte com controle do formato da corrente de entrada. Esse tipo de topologia requer quatro interruptores ativos, bem como permite a bidirecionalidade do fluxo de energia, como dito anteriormente a bidirecionalidade permite a frenagem regenerativa.

Com base no exposto, procurou-se com este trabalho apresentar o estudo teórico, verificando o comportamento do conversor monofásico – trifásico proposto em simulador, utilizando como estrutura ponte retificadora monofásica semicontrolada simétrica e unidade inversora trifásica tipo fonte de tensão. O objetivo principal almejado foi o de produzir através das metodologias apresentadas um projeto robusto, funcional e simples que apresente um bom desempenho para o funcionamento de um motor de indução do tipo trifásico onde não detenha a rede trifásica.

No mercado é possível encontrar alguns conversores monofásicos para trifásicos, o diferencial deste projeto, é que a proposta é para monofásicos 110V e não 220V que é a grande maioria do mercado.

Sabe-se que se deve usar senóide pura caso se queira controlar a velocidade do motor, ou seja, em motores com velocidade variável ou algum equipamento com timer, o que não é objeto deste projeto que é apenas o funcionamento de um motor de indução trifásica, onde uma onda senoidal modificada atende perfeitamente ao objetivo deste trabalho.

Conforme verificado, a corrente de entrada apresentada encontra-se em fase com a tensão de entrada. Fez-se sua análise harmônica e comprovou-se que a mesma apresenta baixo conteúdo harmônico e um fator de potência praticamente

unitário, de 0,947, satisfazendo as expectativas e alcançando o objetivo proposto neste trabalho.

Traz-se alguns pontos positivos confrontando o simulador PSIM utilizado neste trabalho com a confecção de um protótipo de forma direta. Simulando os circuitos, existe a agilidade em montar, desmontar e realizar os testes, fica mais barato uma vez que não se queimam componentes, podem-se fazer gráficos e ver o comportamento de todos os componentes, para que posteriormente possa-se montar um protótipo físico.

Com base nos experimentos realizados em simulação, futuramente realizar a montagem desse protótipo para poder comparar com os resultados das simulações e, se possível, ter a oportunidade de realizar aperfeiçoamentos e mesmo para ter um protótipo que possa ser utilizado em laboratório e ensinamento para alunos em curso técnico.

REFERÊNCIAS

BARROS, B; BORELLI, R; GEDRA, R. **Gerenciamento de energia: ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica**. 2 ed. São Paulo: Editora Érica, 2016.

BERTOLLO; CALIL. **Contribuições ao estudo dos aterramentos de sistemas monofilares com retorno pelo terra**. 2008. Dissertação (Mestrado em Construções rurais e ambiência; Energia na agricultura; Mecanização agrícola; Processamento de produ) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions**. New York: IEEE Press on Power Engineering, 2000.

BOSE, B. K. **Power electronics and motor drives: advances and trends**. Proceedings of the IEEE, 2020.

CADSIMU. Versão 4.0. [S. l.]: Juan Luis Villanueva Montoto, 2004. Disponível em: <http://canalplc.blogspot.com.es>. Acesso em: 6 mar. 2021.

CARRASCO J.M., *et al.* **Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey**. Electronics, IEEE, Transactions on Industrial, 2006.

COVIC, G.A.; PETERS, G.L.; BOYS, J.T. **An improved single phase to three phase converter for low cost AC motor drives**. Trabalho apresentado em evento International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Proceedings. IEEE, 1995.

DECKMANN, S; POMILIO, J. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. 2020. Apostila – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020, Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

DIVAN, D. M. **A new topology for single phase UPS systems**. Society, New Delhi, India, IEEE, Industry Applications, 1989.

DOUGLAS, H; MALENGRET, M. **Symmetrical PWM with a split-capacitor single-phase to three-phase converter for rural electrification**. Proceedings, South Africa, IEEE, 1998.

EMADI, A. **ENERGY - EFFICIENT ELECTRIC MOTORS**. Columbus: Ohio The Ohio State University, 2004.

ENJETI, P. N. **Programmed PWM techniques to eliminate harmonics - A critical evaluation**. IEEE, 1990. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/54257>. Acesso em: 20 mar. 2021.

- ENJETI, P. N.; RAHMAN, A. **A new single-phase to three-phase converter with active input current shaping for low cost ac motor drives.** IEEE, 1993. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/231999>. Acessado em: 20 mar. 2021.
- ENJETI, P. N.; RAHMAN, A.; JAKKLI, R. **Economic single-phase to three-phase converter topologies for fixed and variable frequency output.** IEEE, 1993. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/233290>. Acessado em: 20 mar. 2021.
- ENJETI, P.; CHOUDHURY, S. A. **A Low Cost Single Phase to Three Phase Static Power Converter.** IEEE, 1992. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9194051>. Acessado em: 20 mar. 2021.
- GUEDES, J. A. DA M. **Conversor de tensão alternada com entrada monofásica e saída trifásica, para aplicações rurais.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- LARSEN, J.S. *et al.* F. **Control of a complete digital-based component-minimized single-phase to three-phase AC/DC/AC converter.** Academic Press, 1998. Disponível em: <https://vbn.aau.dk/en/publications/control-of-single-phase-and-three-phase-dcac-converters>. Acessado em: 20 mar. 2021.
- LOWENSTEIN, M. Z. **Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays.** 1. ed. Bosa Roca: John G. Webster, 2003.
- MACHADO, R. Q.; BUSO, S.; POMÍLIO, J.A. **A line-interactive single-phase to threephase converter system.** Trabalho apresentado em Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings. IEEE, 2004.
- MANIAS, S.; ZIOGAS, P. D. **An SMR topology with suppressed DC link components and predictive line current waveshaping.** IEEE, 1987. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4504962>. Acessado em: 20 mar. 2021.
- MATH Graphics Programming. Versão Free. [S. l.]: The MathWorks, Inc, 1994. Disponível em: www.mathworks.com/products/matlab.html. Acesso em: 6 mar. 2021.
- MIRANDA, U. A. **Análise e implementação de conversores monofásico-trifásico.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- PAULILO, G; TEIXEIRA, M. D. **Harmônicos** – conceitos. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed85_fasciculo_qualidade_cap2.pdf Acesso em 11 out. 2020
- PNAD, P. N. **Porcentagem da população brasileira que vive na área urbana.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 11 out. 2020

POMÍLIO, J.A. Conversores CA-CC - Retificadores. In: POMÍLIO, J.A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Unicamp, 2014. cap. 3, p. 1-33.

POMÍLIO, J.A. Conversores CA-CC - Inversores. In: POMÍLIO, J.A. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Unicamp, 2014. cap. 4, p. 34-49.

PRODISP, A. **Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acessado em: 20 mar. 2021.

PROTEUS Design Suite. Versão Prodemo. [S. l.]: Labcenter Electronics Ltd, 1988. Disponível em: www.labcenter.com/downloads. Acesso em: 6 mar. 2021.

PSIM Power Electronics Simulation. Versão Demo. [S. l.]: Powersim Inc, 1994. Disponível em: www.powersimtech.com. Acesso em: 6 mar. 2021.

SANTOS, E.C. *et al.* **Active power line conditioner applied to single-phase to three-phase systems**. In: Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Proceedings. IEEE: Porto, 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5414798>. Acessado em: 20 mar. 2021.

SANTOS, A.M. *et al.* O ensino da engenharia por meio de laboratórios virtuais: software de automação industrial. **Engenharia de Software**, Belém, 2012. Trabalho apresentado no XL Congresso brasileiro de educação em engenharia, 2012, [Belém, PA].

SCAPINI, R.Z. *et al.* Conversor monofásico para trifásico interativo com compensação ativa de tensão monofásica. **Eletrônica de Potência e Controle**, Belo Horizonte, 2014. Trabalho apresentado no 20º Congresso Brasileiro de Automática, 2014, [Belo Horizonte, MG].

SILVA, S. A. O. DA. **Sistemas de energia ininterrupta line interactive trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

SIMAS, E. **Conversores de Corrente Contínua para Corrente Alternada (Inversores)**, 2006. Disponível em: <https://docplayer.com.br/2013210-Disciplina-eletronica-de-potencia-engc48-tema-conversores-de-corrente-continua-para-corrente-alternada-inversores.html>. Acessado em: 20 mar. 2021.

TSHIVHILINGE, E.N.; MALENGRET, M. **A practical control of a cost reduced single phase to three phase converter**. IEEE, 1998. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/711564>. Acessado em: 20 mar. 2021.