

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ADRIANO KORPALSKI MURLIKI

**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE INVERSORES DE TENSÃO PARA
APLICAÇÕES EM AMBULÂNCIAS DE SUPORTE AVANÇADO**

SÃO LEOPOLDO

2020

ADRIANO KORPALSKI MURLIKI

**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA DE INVERSORES DE TENSÃO PARA
APLICAÇÕES EM AMBULÂNCIAS DE SUPORTE AVANÇADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado em
Engenharia Elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. M.e Vinícius André Uberti

SÃO LEOPOLDO

2020

AGRADECIMENTOS

A jornada foi longa e árdua, se fazendo necessário a tomada de decisões difíceis ao longo destes anos de muito estudo, me refiro particularmente aos familiares e amigos mais próximos, que de maneira direta sentiram a minha falta em momentos tão especiais de nossas vidas, mas acredito que todos compreendem da exigência que este curso de engenharia elétrica exige daqueles que buscam sua formação. Por esta consideração e carinho de todos, deixo meus sinceros agradecimentos, por todos os votos de motivação e por que não de oração, nos momentos mais difíceis de aprovação que esta caminhada exigiu, não deixaram que meu corpo e minha alma fraquejassem. Agradeço a todos os professores e principalmente ao meu orientador Prof. M.e Vinícius André Uberti que através do conhecimento, paciência e dedicação na arte de ensinar, me tornaram uma pessoa e um profissional melhor. Não posso deixar de mencionar, todos aqueles colegas que estiveram ao meu lado nesta caminhada, foram inúmeros telefonemas, trocas de mensagens, alegrias e decepções, quantas horas juntos de estudos, isso não tem como esquecer, lembrarei de todos para sempre. Meus agradecimentos a minha esposa Priscila Airoidi Brasil, por me amparar nos momentos mais difíceis, pelas palavras de conforto nos momentos certos, pela mão amiga que me guiou em toda esta trajetória.

RESUMO

Veículos de emergência de suporte avançado (SA) são equipados com bombas de infusão, monitores multiparamétricos, cardioversores, entre outros, que necessitam uma fonte de energia elétrica embarcada segura e que forneça energia com a qualidade, pois visam a manutenção e a preservação da vida. A inexistência na literatura de estudos específicos para esta aplicação, motiva o objeto deste estudo, que é comparar os dois modelos de inversores mais utilizados, visando a melhor aplicação do ponto de vista técnico. O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo da qualidade de energia elétrica dos inversores de tensão de uso automotivo, no emprego específico em ambulâncias de suporte avançado (SA), por meio da análise técnica das características elétricas destes equipamentos. Como parte do estudo, é verificado o aspecto na forma de onda da tensão, corrente e a presença de distúrbios harmônicos, utilizando como referência os critérios da norma brasileira, ABNT-NBR 14561 (2000) e das normas internacionais, KKK-A-1822E (GSA AUTOMOTIVE, 2002) e IEEE 446 (IEEE, 1995). Para viabilizar a análise de qualidade, foram adquiridos dois inversores de tensão monofásicos de uso automotivo, um com a forma de onda quadrada modificada e o outro com a forma de onda senoidal. Inicialmente, foi realizada a modelagem e a simulação destes equipamentos, verificando os sinais PWM, as formas de onda de saída e seus componentes harmônicos. A seguir, realizou-se ensaios práticos com os dois inversores de tensão avaliando suas características técnicas. O estudo comprovou que os resultados das simulações estão de acordo com a literatura existente. Os dados numéricos e gráficos dos ensaios práticos se mostraram válidos do ponto de vista técnico, apontando que o inversor de tensão de onda modificada atende somente a norma brasileira ABNT-NBR 14561 (2000), enquanto que o inversor de tensão de onda senoidal apresenta baixas taxas de distorção harmônica de tensão, atendendo à todas as normas referenciadas neste estudo. Desta forma, para aplicações em ambulâncias de suporte avançado (SA), recomenda-se o emprego do inversor de tensão senoidal, este, por atender de maneira satisfatória os critérios de qualidade de energia elétrica.

Palavras-chave: Inversores de tensão. Qualidade de energia. Veículos de emergência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia básica de geração CA no sistema automotivo	20
Figura 2 - Forma de onda: (a) senoidal, (b) quadrada modificada, (c) quadrada	21
Figura 3 - Relação entre potência e frequência dos componentes eletrônicos	22
Figura 4 - Modulação por largura de pulsos simples	24
Figura 5 - Modulação por largura de pulsos múltipla.....	25
Figura 6 - Modulação por largura de pulsos senoidal.....	26
Figura 7 – Filtro LC passa baixas.....	26
Figura 8 - Topologia de um inversor <i>push-pull</i>	27
Figura 9 - Topologia de condução do método <i>push-pull</i>	28
Figura 10 – Frequência de comutação das chaves.....	29
Figura 11 - Gráfico da curva CBEMA	31
Figura 12 - Gráfico da curva ITIC	32
Figura 13 - Fundamental e a resultante das diversas ordens harmônicas	33
Figura 14 - Representação da decomposição de um sinal distorcido	34
Figura 15 - Representação dos dois tipos de cargas e os dispositivos	37
Figura 16 - Fluxograma do trabalho	41
Figura 17 - Inversores de tensão adquiridos para os testes.....	42
Figura 18 – Tela inicial do software PSIM	44
Figura 19 – Identificação dos componentes da modelagem no PSIM.....	44
Figura 20 - Modelagem da topologia <i>push-pull</i> com modulação PWM linear.....	46
Figura 21 - Modelagem da topologia <i>push-pull</i> com modulação UPWM.....	47
Figura 22 - Modelagem da topologia <i>push-pull</i> com modulação SPWM.....	48
Figura 23 - Modelagem da topologia <i>push-pull</i> com modulação SPWM-LC	49
Figura 24 - Inversor de tensão no teste de consumo em stand-by.....	50
Figura 25 - Inversores de tensão no teste com e sem carga.....	51
Figura 26 – Sinais dos pulsos PWM e a forma de onda da tensão de saída	53
Figura 27 – Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms	54
Figura 28 – Espectro harmônico, para <i>push-pull</i> com modulação PWM linear	55
Figura 29 - Zoom do espectro harmônico, <i>push-pull</i> com modulação PWM linear ...	55
Figura 30 – Sinais dos pulsos PWM e a forma de onda da tensão de saída	56
Figura 31 – Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms	57
Figura 32 – Espectro harmônico, para <i>push-pull</i> com modulação UPWM	58

Figura 33 - Zoom do espectro harmônico, <i>push-pull</i> com modulação UPWM.....	58
Figura 34 - Sinais dos pulsos PWM e a forma de onda da tensão de saída	59
Figura 35 - Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms	60
Figura 36 – Espectro harmônico, para <i>push-pull</i> com modulação SPWM	61
Figura 37 – Zoom do espectro harmônico, <i>push-pull</i> com modulação SPWM.....	61
Figura 38 - Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms	62
Figura 39 – Espectro harmônico, para <i>push-pull</i> com modulação SPWM-LC.....	63
Figura 40 – Zoom do espectro harmônico, <i>push-pull</i> com modulação SPWM-LC	64
Figura 41 - Inversor de tensão onda modificada, consumo em stand-by	65
Figura 42 - Inversor de tensão senoidal, consumo em stand-by.....	66
Figura 43 – Inversor de tensão onda modificada no teste sem carga	67
Figura 44 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio.....	67
Figura 45 - Forma de onda da tensão com o analisador	68
Figura 46 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio	69
Figura 47 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão	69
Figura 48 - Inversor de tensão onda senoidal no teste sem carga.....	70
Figura 49 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio.....	70
Figura 50 - Forma de onda da tensão com o analisador	71
Figura 51 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio	72
Figura 52 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão	72
Figura 53 - Inversor de tensão onda modificada no teste com carga linear	73
Figura 54 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio.....	74
Figura 55 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio.....	74
Figura 56 – Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio.....	75
Figura 57 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão	75
Figura 58 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente elétrica	76
Figura 59 - Inversor de tensão onda senoidal no teste com carga linear	76
Figura 60 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio.....	77
Figura 61 - Forma de onda da tensão com o analisador	78
Figura 62 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio	78
Figura 63 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão	79
Figura 64 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente	79
Figura 65 - Inversor de tensão onda modificada no teste com carga não linear	80
Figura 66 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio.....	81

Figura 67 - Forma de onda da tensão com o analisador	81
Figura 68 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio	82
Figura 69 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão	83
Figura 70 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente	83
Figura 71 - Inversor de tensão onda senoidal no teste com carga não linear	84
Figura 72 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio	84
Figura 73 - Forma de onda da tensão com o analisador	85
Figura 74 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio	86
Figura 75 – Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão.....	86
Figura 76 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente	87
Figura 77 – Tensão, corrente e frequência nos terminais de carga	87
Figura 78 - Tensão, corrente e frequência nos terminais de carga	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados elétricos dos equipamentos médicos de um veículo SA19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos inversores de tensão monofásicos	43
Tabela 2 - Harmônicas da modulação com PWM linear	56
Tabela 3 - Harmônicas da modulação com UPWM.....	59
Tabela 4 - Harmônicas da modulação com SPWM.....	62
Tabela 5 - Harmônicas da modulação com SPWM-LC	64
Tabela 6 - Harmônicas das modulações, PWM, UPWM, SPWM e SPWM-LC	89
Tabela 7 - Dados de tolerância dos inversores de tensão adquiridos	90
Tabela 8 - Dados obtidos nos testes práticos.....	90
Tabela 9 - Dados obtidos nos testes práticos.....	91

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
CC	Corrente Contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
DHT _v	Distorção Harmônica Total de Tensão
DHT _i	Distorção Harmônica Total de Corrente
FD	Fator de Distorção
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - Transformada Rápida de Fourier
FH ⁿ	Fator Harmônico de N-ésima Harmônica
GSA	<i>General Service Administration</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off-Thyristor</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PSIM	<i>Powersim</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SA	Suporte Avançado
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
UPWM	<i>Uniform Pulse Width Modulation</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivos Específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Veículos de Emergência	16
2.1.1 Ambulâncias de Suporte Avançado (SA) Tipo D.....	18
2.2 Inversores de Tensão Monofásicos de Uso Automotivo	19
2.2.1 Técnicas de Controle Para Inversores de Tensão	23
2.2.2 Inversor de Tensão <i>Push-Pull</i>	27
2.3 Qualidade de Energia Elétrica	29
2.3.1 Regulação Sobre a Qualidade de Energia	30
2.4 Harmônicos	33
2.4.1 Fator Harmônico de N-ésima Harmônica (FH)	35
2.4.2 Distorção Harmônica Total (DHT)	36
2.4.3 Fator de Distorção (FD).....	36
2.4.4 Cargas Produtoras de Harmônicos	37
2.5 Trabalhos Correlatos	38
3 METODOLOGIA	41
3.1 Apresentação Geral	41
3.2 Dados e Parâmetros Elétricos dos Equipamentos	42
3.3 Modelagem no Software PSIM	43
3.3.1 Modelagem da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação PWM Linear	45
3.3.2 Modelagem da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação UPWM	46
3.3.3 Modelagem da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação SPWM	47
3.3.4 Modelagem da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação SPWM-LC.....	48
3.4 Testes Práticos nos Inversores de Tensão – sem Carga e com Carga	49
3.4.1 Consumo da Fonte CC com o Inversor Desligado	50
3.4.2 Formas de Onda, Tensão, Espectro da Amplitude e de Fase.....	50
3.5 Análise dos Resultados	51
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS ...	53

4.1 Simulações no Software PSIM	53
4.1.1 Simulação da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação PWM Linear	53
4.1.2 Simulação da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação UPWM	56
4.1.3 Simulação da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação SPWM	59
4.1.4 Simulação da Topologia <i>Push-Pull</i> com Modulação SPWM-LC.....	62
4.2 Testes Práticos nos Inversores de Tensão - sem Carga	65
4.2.1 Consumo da Fonte CC com o Inversor Desligado	65
4.2.2 Formas de Onda, Tensão, Espectro da Amplitude e de Fase.....	66
4.3 Testes Práticos nos Inversores de Tensão – com Carga	73
4.3.1 Testes com Carga Linear e Não Linear.....	73
4.3.2 Teste com Carga Nominal de 1000 W.....	87
4.4 Análise das Simulações com os Resultados Práticos dos Ensaios.....	88
5 CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

O grande avanço da tecnologia em vários segmentos fez crescer a utilização de componentes eletrônicos. Um destes seguimentos foi o de equipamentos de uso médico, que possuem em sua maioria fontes chaveadas para alimentação CA (Corrente Alternada). Estas fontes adotam dispositivos semicondutores como transistores, diodos e capacitores que em conjunto operam na condição de condução ou bloqueio, e fazem surgir uma série de distúrbios, afetando outras cargas e a própria fonte de energia.

Uma destas fontes de energia é o inversor de tensão, que, dentre as suas inúmeras aplicações, é utilizado em ambulâncias de suporte avançado (SA), para acionar cargas que demandam por padrão entrada de energia CA com valor eficaz entre 110 V e 220 V. Todavia, é imprescindível ressaltar que um veículo de suporte avançado é a melhor estrutura em termos de recursos sobre rodas que um médico dispõe para exercer a medicina de urgência e emergência. À disposição da equipe, estão vários equipamentos conectados ao fornecimento de energia elétrica que por sua vez estão monitorando, salvando ou reanimando pacientes.

Basicamente, a função de um inversor é converter uma fonte de tensão ou corrente de entrada CC (Corrente Contínua) em uma tensão ou corrente de saída CA, mantendo a amplitude e frequência dentro dos limites desejados. O inversor de tensão ideal é aquele que não sofre a ação de cargas perturbadoras, denominadas não lineares, como fontes chaveadas e retificadores, que provocam o surgimento de harmônicos, alterando as formas de onda no inversor de tensão.

Diante destas questões que afetam a utilização de inversores de tensão, se faz necessário um estudo maior da topologia e das técnicas de modulação destes equipamentos.

Será estudada a topologia *push-pull* com as modulações PWM linear, do inglês *Pulse Width Modulation*, modulação por pulsos múltiplos UPWM, do inglês *Uniform Pulse Width Modulation* e com a modulação SPWM, do inglês *Sinusoidal Pulse Width Modulation*. Ainda no estudo, serão testados dois inversores de tensão monofásicos de uso em veículos de emergência, com entrada de tensão 12 Vdc e saída de 127 Vca, com frequência de 60 Hz e uma potência nominal de 1000 W. A diferença principal entre os dois inversores é em relação à forma de onda da saída, um possui saída do tipo quadrada modificada e o outro do tipo senoidal.

O estudo é válido não somente pelo lado técnico, mas porque não dizer pelo lado humano, afinal se está tratando de vidas que dependem de um fornecimento de energia elétrica ininterrupto e de qualidade para fazer a diferença.

1.1 Justificativa

A norma brasileira que regulamenta o seguimento de ambulâncias de suporte avançado, a NBR 14561 (VEÍCULOS PARA ATENDIMENTO A EMERGÊNCIAS MÉDICAS E RESGATE), não faz qualquer determinação de uso obrigatório de inversores de tensão de onda quadrada modificada ou de inversores de tensão de onda senoidal. Dessa forma, fica a cargo das empresas do ramo de transformação de veículos especiais decidirem sobre qual tecnologia irão adotar, ocorrendo em sua maioria, a opção pelo equipamento de menor custo.

Na prática, as fontes chaveadas de equipamentos médicos que utilizam na sua eletrônica a referência de uma onda senoidal para seu funcionamento, rejeitam inversores de tensão com a característica de onda quadrada modificada, ocasionando mal funcionamento e em alguns casos o não funcionamento do equipamento.

A inexistência na literatura de estudos específicos sobre esta aplicação, motiva o objeto deste estudo, que é comparar os dois modelos de inversores mais utilizados, visando a melhor aplicação do ponto de vista técnico.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo da qualidade de energia elétrica dos inversores de tensão de uso automotivo no emprego específico em ambulâncias de suporte avançado (SA), por meio da análise prática das características elétricas destes equipamentos, utilizando como referência os critérios das normas ABNT-NBR 14561 (ABNT, 2000), KKK-A-1822E (GSA AUTOMOTIVE, 2002) e IEEE 446 (*Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*), (IEEE, 1995).

1.2.1 Objetivos Específicos

Com o intuito de complementar o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Modelar e simular a topologia *push-pull* com modulação a três níveis para o PWM linear, UPWM, SPWM e SPWM-LC (adicionado o filtro na saída, indutor e capacitor);
- Realizar os testes práticos nos inversores de tensão monofásicos de onda quadrada modificada e senoidal, na condição sem carga e com carga;
- Analisar as formas de onda de tensão e de corrente, verificando a presença de distúrbios harmônicos;
- Analisar as simulações e os testes práticos para sugerir qual o tipo de inversor mais adequado para o emprego em ambulâncias de suporte avançado (SA).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentado a seguir, a revisão teórica relacionada aos inversores de tensão CC/CA monofásicos destinados ao emprego automotivo com o foco na aplicação em veículos de emergência.

Nesta etapa serão apresentados os conceitos relacionados aos inversores de tensão CC/CA com a característica monofásica, as suas formas de controle, métodos de modulação, suas formas de onda, seus componentes harmônicos, buscando a qualidade no fornecimento de energia para o desempenho das funções.

2.1 Veículos de Emergência

A norma ABNT-NBR 14561 (2000), define as condições mínimas exigíveis para o projeto, construção e desempenho de veículos para atendimento a emergências médicas e resgate. Esta norma, também, descreve veículos que estão autorizados a ostentar o símbolo “ESTRELA DA VIDA” e a palavra “RESGATE”, e estabelece especificações mínimas, parâmetros para ensaio e critérios essenciais para desempenho, aparência e acessórios, visando uma padronização para estes veículos.

Algumas das premissas da norma ABNT-NBR 14561 (2000) é tornar os veículos de emergências médicas e resgates conhecidos em todo território nacional. Adequadamente construídos, de fácil manutenção, e quando contando com equipe profissional adequada, possam fazer a diferença a vida. Importante salientar que a norma brasileira se baseia na norma americana (KKK-A-1822E *Federal Specification for the “Star-of-Life Ambulance”, GENERAL SERVICE ADMINISTRATION*) (GSA AUTOMOTIVE, 2002).

A ambulância deve ser projetada e construída para garantir segurança, conforto e evitar o agravamento da lesão ou doença do paciente. A ambulância é definida como um veículo para atendimento médico de emergência que fornece:

- um compartimento do motorista;
- um compartimento de paciente, com capacidade para acomodar um técnico de emergência médica e dois pacientes;
- equipamentos e suprimentos para atendimento de emergência no local e durante o transporte;
- comunicação via rádio; e,

- quando necessário, equipamentos para procedimentos leves de resgate / remoção.

Com base na norma ABNT-NBR 14561 (2000), foi criada a portaria N° 2048/GM (2002), do Ministério da Saúde do Brasil que define ambulância como um veículo (terrestre, aéreo ou aquaviário) que se destine exclusivamente ao transporte de enfermos e as classifica da seguinte forma:

- **tipo a - ambulância de transporte:** veículo destinado ao transporte em decúbito horizontal de pacientes que não apresentam risco de vida, para remoções simples.
- **tipo b - ambulância de suporte básico:** veículo destinado ao transporte inter-hospitalar de pacientes com risco de vida conhecido e ao atendimento pré-hospitalar de pacientes com risco de vida desconhecido, não classificado com potencial de necessitar de intervenção médica no local e/ou durante transporte até o serviço de destino.
- **tipo c - ambulância de resgate:** veículo de atendimento de urgências pré-hospitalares de pacientes vítimas de acidentes ou pacientes em locais de difícil acesso, com equipamentos de salvamento (terrestre, aquático e em alturas).
- **tipo d - ambulância de suporte avançado:** veículo destinado ao atendimento e transporte de pacientes de alto risco em emergências pré-hospitalares e/ou de transporte inter-hospitalar que necessitam de cuidados médicos intensivos. Deve contar com os equipamentos médicos necessários para esta função.
- **tipo e - aeronave de transporte médico:** aeronave de asa fixa ou rotativa utilizada para transporte inter-hospitalar de pacientes e aeronave de asa rotativa para ações de resgate, dotada de equipamentos médicos.
- **tipo f - embarcação de transporte médico:** veículo motorizado aquaviário, destinado ao transporte por via marítima ou fluvial. Deve possuir os equipamentos médicos necessários ao atendimento de pacientes conforme sua gravidade.

Para o aprofundamento do estudo dos inversores de tensão monofásicos e seus impactos, será adotado como critério de análise as ambulâncias de suporte

avanzado – tipo d, uma vez que as mesmas empregam equipamentos de atendimento e manutenção à vida e necessitam do fornecimento de tensão alternada de qualidade.

2.1.1 Ambulâncias de Suporte Avanzado (SA) Tipo D

A portaria N° 2048/GM, (2002) do Ministério da Saúde do Brasil, estabelece algumas diretrizes para o enquadramento de um veículo tipo d, denominado de ambulância de resgate, será citado os mais relevantes para o estudo:

- veículo em geral, deve conter: sistema de sinalização acústico e visual; rádio de comunicação e cones de sinalização;
- proteção a equipe, deve conter: equipamentos de proteção individual;
- compartimento do paciente, deve conter: um salão de atendimento às vítimas de, no mínimo 8 m³, maca com rodas e articulada; dois suportes de soro; cadeira de rodas dobrável; instalação de rede portátil de oxigênio (é obrigatório que a quantidade de oxigênio permita ventilação mecânica por no mínimo duas horas);
- equipamentos de manutenção/preservação a vida, deve conter: oxímetro não-invasivo portátil; monitor cardioversor com bateria e instalação elétrica disponível; bomba de infusão com bateria e equipo; respirador mecânico de transporte; para o atendimento a neonatos deverá haver pelo menos uma incubadora de transporte de recém-nascido.

O fornecimento de energia aos equipamentos médicos fica a cargo do inversor de tensão CC para CA, conectado à rede CA do veículo. Este dispositivo deve ser capaz de fornecer pelo menos 750 W de potência com uma frequência de (60 ± 4) Hz. A tensão de saída deve permanecer regulada no intervalo de (105 a 135) V, considerando uma tensão de entrada de (12,8 a 14,8) V. Este dispositivo deve ser capaz de operar todos os tipos de carga em CA, incluindo-se as resistivas e reativas (ambas indutivas ou capacitivas).

Para que o inversor de tensão opere com uma maior autonomia e segurança, devem ser fornecidas, no mínimo, duas baterias de 12 V (a original mais uma). A bateria acrescida ao sistema, deve ser equivalente à bateria original do veículo, segundo à norma ABNT-NBR 14561 (2000).

O quadro 1, demonstra os dados elétricos, obtidos dos manuais dos fabricantes, dos equipamentos médicos mais utilizados em um veículo de suporte

avançado (SA). O objetivo é quantificar a demanda que estes equipamentos exigem quando conectados ao inversor de tensão.

Quadro 1 - Dados elétricos dos equipamentos médicos de um veículo SA

Fabricante	Equipamento	Modelo	Tensão (Vca)	Frequência (Hz)	Potência (W)
Fanem	Incubadora Neonatal	1186	110 – 220	50 / 60	300
Instramed	Monitor Multiparâmetro	In Max	100 – 240	50 / 60	78
	Cardioversor/Desfibrilador	Cardiomax	110 – 240	50 / 60	260
Samtronic	Bomba de Infusão linear	ST1000	100 – 240	50 / 60	16,25
	Bomba de Infusão rotativa	ST550 T2	110 – 230	50 / 60	13,65
Magnamed	Ventilador Pulmonar	OxyMag	110 – 240	50 / 60	40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode-se observar no quadro 1, se for considerado o pior cenário, isto é, todos equipamentos em funcionamento simultaneamente, a carga para o inversor de tensão, será de aproximadamente 708 W.

2.2 Inversores de Tensão Monofásicos de Uso Automotivo

A função básica de um inversor consiste em converter uma fonte de tensão ou corrente de entrada CC em uma tensão ou corrente de saída CA simétrica de amplitude e frequência desejadas (RASHID, 2014; ARRABAÇA; GIMENEZ, 2016).

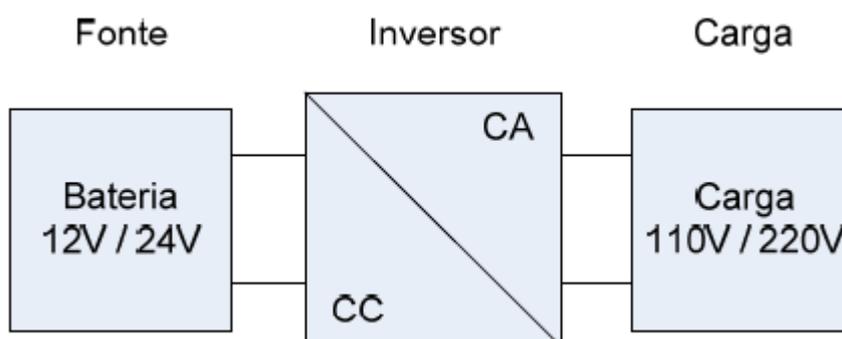
Os inversores podem ser classificados em dois grupos: inversores de tensão e inversores de corrente. Os inversores de tensão têm como entrada uma fonte de tensão ou um capacitor de valor elevado. Já os inversores de corrente apresentam na sua entrada uma fonte de corrente ou um indutor de valor elevado que caracterize este efeito.

O estudo somente abordará os inversores de tensão CC para CA monofásicos de emprego automotivo que tem na sua maioria a fonte de tensão CC como sendo uma bateria automotiva ou estacionária 12 V (HART, 2001).

Nestas aplicações a única fonte de energia CC estável é a bateria do veículo, fazendo-se indispensável a utilização de um inversor para acionar cargas que demandam energia elétrica CA com valores nominais de 110 Vca.

Na Figura 1 é possível observar em blocos as etapas da topologia de geração embarcada, reforçando que a única fonte CC é a própria bateria.

Figura 1 - Topologia básica de geração CA no sistema automotivo



Fonte: Adaptado de Tiggemann (2008).

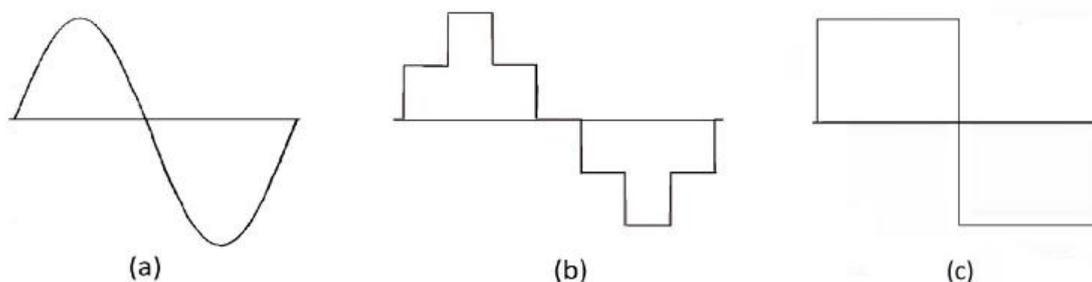
Hart (2001) e Pomilio (2007) completam afirmando que os inversores fundamentalmente transferem energia de uma fonte CC para uma carga CA, com as formas de onda senoidais ou aproximadas de uma senóide.

Ainda segundo Pomilio (2007), o inversor deve ser capaz de fornecer uma tensão alternada, com frequência, forma e amplitude invariantes, independente de oscilações que possam ocorrer na alimentação CC ou até mesmo na própria carga.

Para Rashid (2014), tanto a tensão de saída como a frequência pode ser fixa ou variável. Em um primeiro cenário uma tensão de saída variável pode ser obtida variando-se a amplitude da tensão CC de entrada e desta forma mantendo-se o ganho do inversor constante. Já em um segundo cenário, se a tensão CC de entrada for fixa e não controlável, uma tensão de saída variável pode ser obtida pela variação do ganho do inversor, normalmente realizada pelo controle modulação por largura de pulso (PWM) adjunto de uma das etapas internas de controle e modulação do inversor. De maneira bem simples, para se obter o ganho de um inversor basta fazer a relação entre a tensão de saída CA e a tensão de entrada CC.

Segundo Ahmed (2000), os inversores são circuitos estáticos por não possuírem partes móveis em sua concepção de projeto, e convertem potência CC em potência CA com a frequência e tensão de saída desejada. A tensão de saída tem uma forma de onda periódica que, embora não-senoidal (“onda quadrada modificada ou senoidal modificada”), pode, com uma boa aproximação, chegar a ser considerada como tal. Há muitos tipos de inversores, classificados de acordo com o número de fases, com a utilização de dispositivos semicondutores de potência, com os princípios de comutação e principalmente com as formas de onda de saída. A Figura 2 apresenta os três tipos mais comuns disponíveis nos inversores de emprego automotivo.

Figura 2 - Forma de onda: (a) senoidal, (b) quadrada modificada, (c) quadrada



Fonte: Adaptado de Santos (2017).

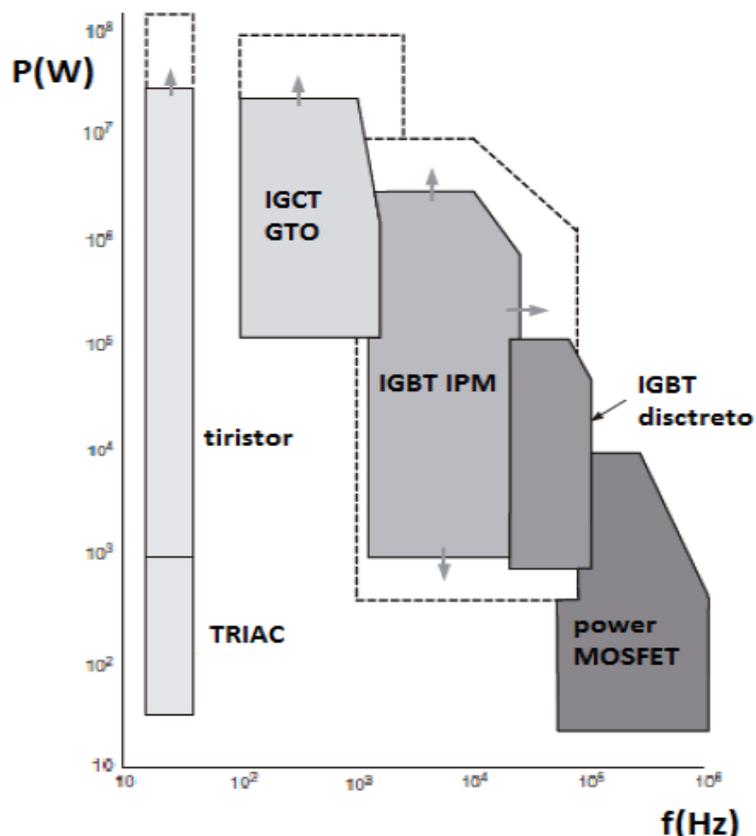
As formas de onda da tensão de saída de inversores ideais deveriam ser senoidais, entretanto as formas de onda de inversores na realidade são não-senoidais e contém altos conteúdos harmônicos. Todavia Arrabaça; e Gimenez (2016), salientam que a utilização de circuitos moduladores e filtros reduzem a presença de tais harmônicos tão indesejáveis.

Para aplicações de baixa e média potências, tensões de onda quadrada ou quase quadrada podem ser aceitáveis; e para aplicações de potência elevada, são necessárias formas de onda senoidais com baixa distorção. Com a disponibilidade de dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, o conteúdo harmônico da tensão de saída pode ser minimizado ou reduzido significativamente pelas técnicas de chaveamento.

Uma destas técnicas utilizadas em inversores novos é o emprego de tiristores GTO (*Gate Turn-Off-Thyristor*), como chave de potência para demandas acima de 1 MW e transistores IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), ou até mesmo MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), para demandas menores. Em contrapartida, os inversores mais antigos utilizam a técnica que empregava como elemento ou chave de potência tiristores SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), com bloqueio por circuitos ressonantes (ARRABAÇA; GIMENEZ, 2016).

Na Figura 3, a linha pontilhada que acompanha as classes de componentes eletrônicos de potência indica a tendência de avanço conforme o incremento de potência (W) e/ou incremento de frequência de chaveamento (Hz).

Figura 3 - Relação entre potência e frequência dos componentes eletrônicos



Fonte: Adaptado de Turcatto (2010).

De acordo com Pereira (2003) e Schiavon (2007), os inversores de tensão que possuem em sua saída uma tensão CA com forma de onda senoidal pura, operam todos os tipos de equipamentos que precisam de alimentação de tensão CA de boa qualidade. Sua distorção harmônica total de tensão (DHTv) fica entre 1 a 5%. Tensão na forma senoidal pura é indicada principalmente para alimentação de cargas críticas, como por exemplo, equipamentos de uso médico que necessitam de um fornecimento desta natureza.

Já, a tensão na forma de onda senoidal aproximada ou onda quadrada modificada possui qualidade abaixo da forma de onda senoidal pura, e consegue alimentar a maioria dos equipamentos domésticos, bem como computador, monitor de vídeo e notebook com boa eficiência, dado que apresenta DHTv em torno de (15 a 35) %. Todavia algumas fontes de tensão CA/CC são suscetíveis quanto a leitura desta forma de onda, por este motivo se faz necessário uma análise criteriosa. Por fim, a tensão em forma de onda quadrada apresenta a pior eficiência comparada com as anteriores, uma vez que a DHTv fica em torno de (60 a 80) %, e seu uso é irregular a várias aplicações, inclusive em cargas indutivas.

Todavia, Santos (2017) reforça que os inversores estão inseridos em um sistema de geração de energia elétrica, sendo um elo importantíssimo desta cadeia e por isso se tornam dispositivos fundamentais á inúmeras aplicações. Entretanto, dentro do cenário atual é necessário o desenvolvimento de dispositivos de alta confiabilidade e alto desempenho. Sendo essas características possivelmente obtidas através de dispositivos semicondutores híbridos e métodos de chaveamento operando em alta frequência.

2.2.1 Técnicas de Controle Para Inversores de Tensão

Para Rashid (2014), Ahmed (2000) e Chitode (2009), na grande maioria das aplicações dos inversores de tensão, se faz necessário o controle da tensão de saída para compensar as variações da tensão CC de entrada, realizar esta regulação mantendo os requisitos de controle de tensão e frequência constantes é um desafio. Existem algumas técnicas diferentes para variar o ganho (por consequência a tensão de saída) dos inversores, como através da variação da tensão CC da entrada, através da variação da tensão CA da saída e através de modulação PWM. Atualmente, o método mais eficiente de controle do ganho é o de incorporar o controle PWM nos inversores.

O método PWM (Modulação por Largura de Pulso) se baseia no princípio de que, a tensão de saída é uma onda modulada por largura de pulso, controlada pela variação da duração dos pulsos.

Na eletrônica já existem circuitos separados como TL494 para a geração do PWM linear conhecido como PWM de pulso único, muito aplicado em inversores com onda quadrada modificada, bem como a placa EGS-3 para a geração do SPWM, conhecido como PWM senoidal, muito aplicado em inversores com onda senoidal pura.

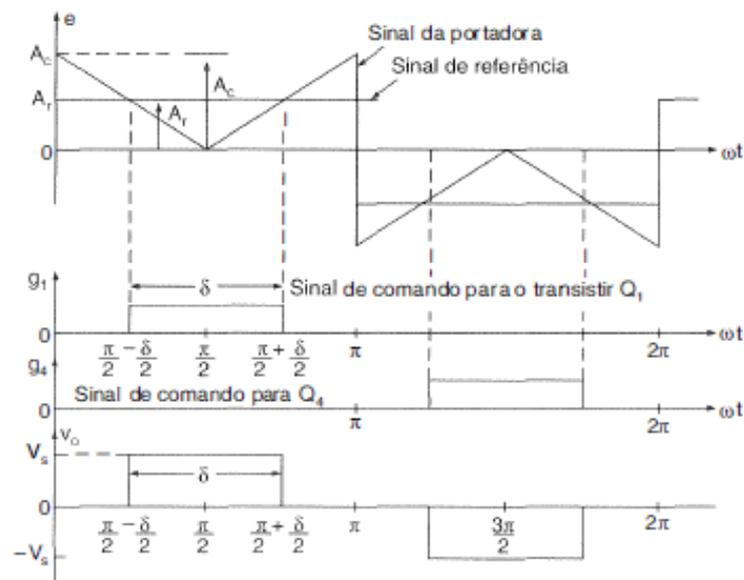
Outras técnicas visam a diminuição ou ao menos o deslocamento das componentes harmônicas para frequências mais altas. Entretanto, será abordado somente os três métodos, atualmente presentes nos inversores de tensão destinados ao emprego automotivo.

Os três métodos mais utilizados são: modulação por largura de pulsos simples ou único (PWM linear); modulação por largura de pulsos múltipla (UPWM); modulação

por largura de pulsos senoidal (SPWM), na concepção de (RASHID, 2014; AHMED, 2000 e CHITODE, 2009):

O primeiro método consiste na modulação por largura de pulsos simples ou único (PWM linear) do inglês (*Pulse Width Modulation*). Neste método de modulação uma onda triangular é comparada a um sinal de referência, desta forma a intersecção destes sinais geram um pulso por semiciclo, sendo que sua largura é utilizada no controle de tensão de saída do inversor. A Figura 4 demonstra este método de maneira bem simples.

Figura 4 - Modulação por largura de pulsos simples



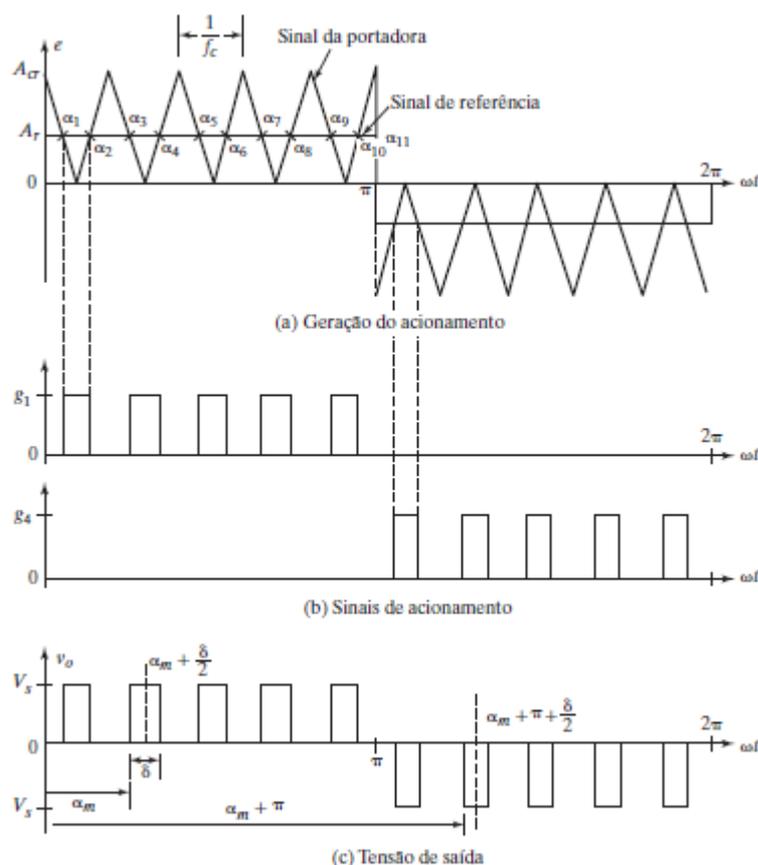
Fonte: Adaptado de Rashid (2014).

A tensão de saída pode ser ajustada de maneira linear máximo (0°) e o zero (180°). Na visão de Hart (2001), esta modulação possui duas vantagens a diminuição de componentes nas etapas dos filtros dos harmônicos e também nos controles da amplitude de saída. A desvantagem é que os circuitos dos comutadores precisam ser mais complexos para realizar o chaveamento.

O segundo método consiste na modulação por largura de pulsos múltipla (UPWM) do inglês (*Uniform Pulse Width Modulation*). Este método possui o objetivo de reduzir o conteúdo harmônico e aumentar as frequências das harmônicas para a diminuição do tamanho e dos custos dos filtros, geralmente são produzidos vários pulsos em cada semiciclo, isto ocorre através da geração dos sinais de acionamento, para ligar e desligar os transistores.

Na Figura 5 é possível entender melhor a modulação visualizando o ponto de interseção das ondas, para geração do PWM.

Figura 5 - Modulação por largura de pulsos múltipla



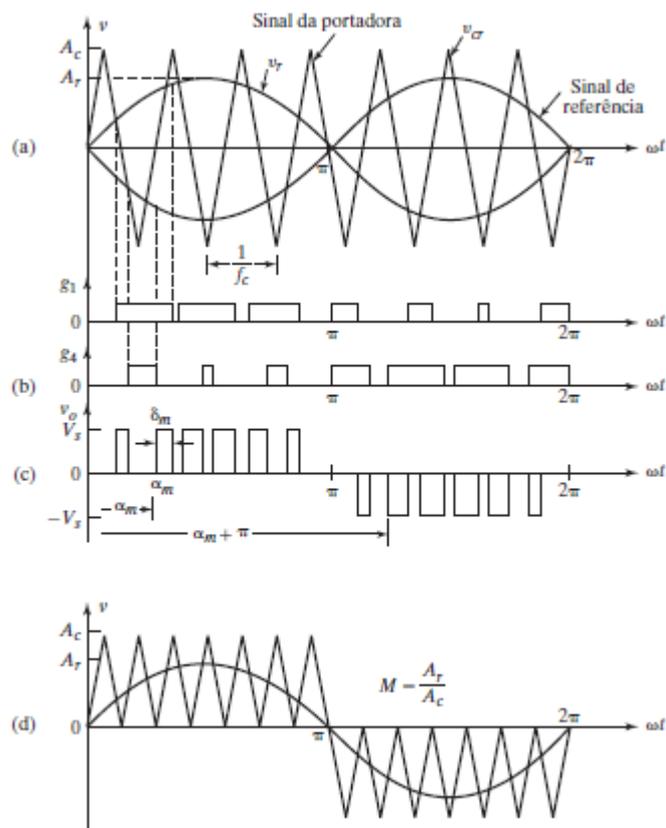
Fonte: Adaptado de Rashid (2014).

Como demonstra a Figura 5b, os sinais de acionamento dos transistores são gerados pela comparação de um sinal de referência com uma onda portadora triangular, Figura 5a. A forma de onda do sinal de saída pode ser vista na Figura 5c.

O terceiro método consiste na modulação por largura de pulsos senoidal (SPWM) do inglês (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*). A técnica do PWM senoidal, também chamada de SPWM, consiste na geração de uma onda senoidal de baixa frequência que é utilizada como referência (v_r) para ser comparada com uma onda triangular de alta frequência.

Na Figura 6 é possível entender melhor a modulação visualizando o ponto de interseção das ondas, para geração do SPWM.

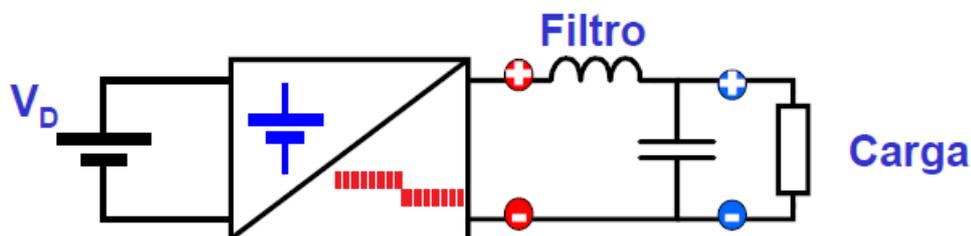
Figura 6 - Modulação por largura de pulsos senoidal



Fonte: Adaptado de Rashid (2014).

A intersecção destas duas formas de onda demonstrada na Figura 6a, vai determinar os tempos de acionamentos dos transistores, Figura 6c. A frequência da saída do inversor de tensão é determinada pela frequência do sinal de referência. O índice de modulação e a tensão eficaz de saída são controlados pela amplitude máxima A_r , Figura 6d. A grande vantagem desta modulação é deslocar os componentes harmônicos para as altas frequências, com isso o fator de distorção e os harmônicos de mais baixa ordem são reduzidos significativamente. Conforme, Canesin 2016, pode-se inserir na saída do inversor de tensão um filtro LC, composto basicamente por um indutor e um capacitor, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Filtro LC passa baixas



Fonte: Adaptado de Canesin (2016).

Trata-se de um filtro passa baixas com frequência de corte acima da frequência de operação, em geral 50 ou 60 Hz. Deste modo o filtro é capaz de produzir uma atenuação significativa nas frequências de kHz.

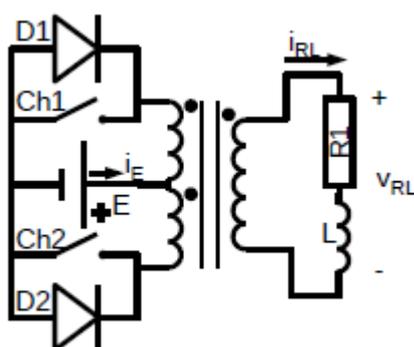
2.2.2 Inversor de Tensão *Push-Pull*

Segundo Libert (2015) e Ahmed (2000), o inversor de tensão *push-pull* é muito utilizado pela indústria em aplicações de baixa potência e baixa frequência, com algumas características:

- possui um transformador com ponto médio no primário;
- necessita de apenas uma fonte geradora CC;
- necessita apenas de duas chaves interruptoras (transistores);
- a carga CA é isolada da fonte CC;
- a fonte e os interruptores estão ligados a mesma massa.

A Figura 8 ilustra a topologia de um inversor *push-pull*, muito utilizada em aplicações automotivas, motivo pelo qual, será o objeto de estudo deste trabalho. Este conjunto é chaveado em alta frequência, comumente utilizado PWM linear ou SPWM. Quando o chaveamento for em PWM linear, a onda de saída do inversor de tensão será do tipo quadrada modificada. Entretanto, quando o chaveamento for em SPWM, a onda de saída do inversor de tensão será do tipo senoidal. Nos inversores automotivos em geral este transformador possui o valor de tensão de entrada de 12 + 12 V e saída 150 V ou entrada de 12 + 12 V e saída de 250 V.

Figura 8 - Topologia de um inversor *push-pull*



Fonte: Adaptado de Libert (2015).

As formas de condução podem ser divididas em 4 etapas descritas a seguir, de acordo com os ciclos de operação:

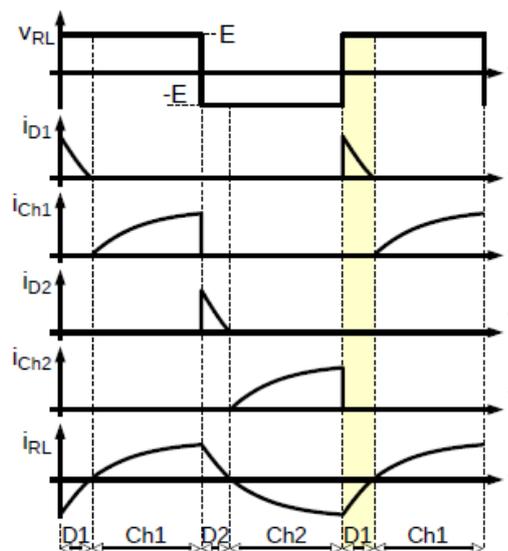
Na primeira etapa a chave ch1 é colocada em condução enquanto a chave ch2 permanece bloqueada. A tensão de entrada da fonte $+E$ é aplicada em metade do enrolamento primário por acoplamento indutivo a tensão $E_0 = +E/a$, onde $a = n_1/n_2$ é aplicada nos terminais da carga RL . Desta forma a corrente de carga i_{RL} , cresce exponencialmente.

Na segunda etapa a chave ch2 é comandada, mas o sentido da corrente não é propício a condução. Deste modo a corrente se extingue por d_2 . A tensão é negativa na carga.

Na terceira etapa ocorre a anulação da corrente i_{RL} , pois neste instante a chave ch2 é colocada a conduzir. Desta forma a tensão nos terminais da carga continua sendo $E_0 = -E/a$. Então a corrente de carga cresce exponencialmente.

Na quarta etapa a chave ch2 é aberta, desta forma d_2 entra em condução, mas a tensão nos terminais da carga mantém $E_0 = +E/a$. A corrente de carga decresce exponencialmente. Este ciclo se encerra quando a corrente se anula e a chave ch2 entra em condução, dando início a um novo ciclo de funcionamento, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Topologia de condução do método *push-pull*



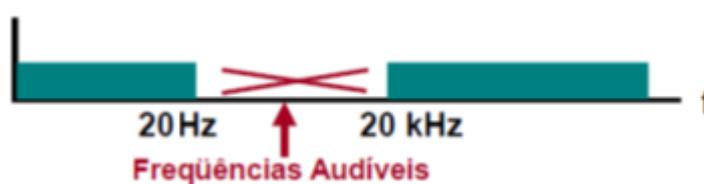
Fonte: Adaptado de Libert (2015).

Na Figura 9 é possível visualizar graficamente os instantes de cada ciclo de operação, como condução, bloqueio, tensão e corrente na carga. As componentes envolvidas no método *push-pull* são:

(V_{RL}) tensão na carga, (i_{D1}) corrente no diodo 1, (i_{Ch1}) corrente na chave 1, (i_{D2}) corrente no diodo 2, (i_{Ch2}) corrente na chave 2 e (i_{RL}) corrente na carga.

Canesin (2016), recomenda que o chaveamento das chaves preferencialmente deve ocorrer em uma frequência superior a 20 kHz, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Frequência de comutação das chaves



Fonte: Adaptado de Canesin (2016).

Nesta faixa estão as frequências audíveis aos seres humanos, desta maneira é possível minimizar incômodos que o equipamento inversor de tensão pode produzir quando em funcionamento.

2.3 Qualidade de Energia Elétrica

A qualidade de energia elétrica ideal, é aquela que propicia um fornecimento de energia adequado visando a operação correta de um equipamento. Ainda, segundo Silva (2012) e Garcez (2000), o fornecimento de energia elétrica de qualidade, deve atender aos requisitos denominados adequados de tensão e frequência, para um funcionamento correto, contínuo e invariavelmente seguro, para máquinas e processos.

Para Paulillo (2017), os equipamentos atuais estão mais suscetíveis às oscilações presentes na energia elétrica do que se comparado a dispositivos do passado, pois atualmente o largo emprego de microprocessadores e unidades de controle/potência depende diretamente dos parâmetros adequados de fornecimento da energia elétrica, para não apresentarem falhas de funcionamento.

Todavia, Paulillo e Ribeiro (2013) apontam que a qualidade da energia elétrica nada mais é do que qualquer mudança na magnitude, forma de onda ou frequência

da tensão e/ou corrente elétrica, que por consequência gere falha ou operação inadequada de equipamentos elétricos.

Ainda, Bonfim (1998), aponta que um dos indicativos da qualidade de energia de um inversor é a forma de onda da tensão de saída, que depende das etapas de conversão e filtragem adotados para minimizar os harmônicos tão indesejáveis.

Paulillo e Ribeiro (2013) entendem que o conceito de qualidade de energia elétrica é muito mais amplo envolvendo diversos fenômenos, com detalhes e peculiaridades inerentes, pois engloba aspectos relacionados à continuidade do fornecimento de energia elétrica e sobretudo o aspecto do atendimento aos parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes, pois abrangem inúmeras áreas de interesse de sistemas de energia.

No entendimento de Pires (2006), a qualidade de energia pode ser dividida em cinco categorias conforme a seguir:

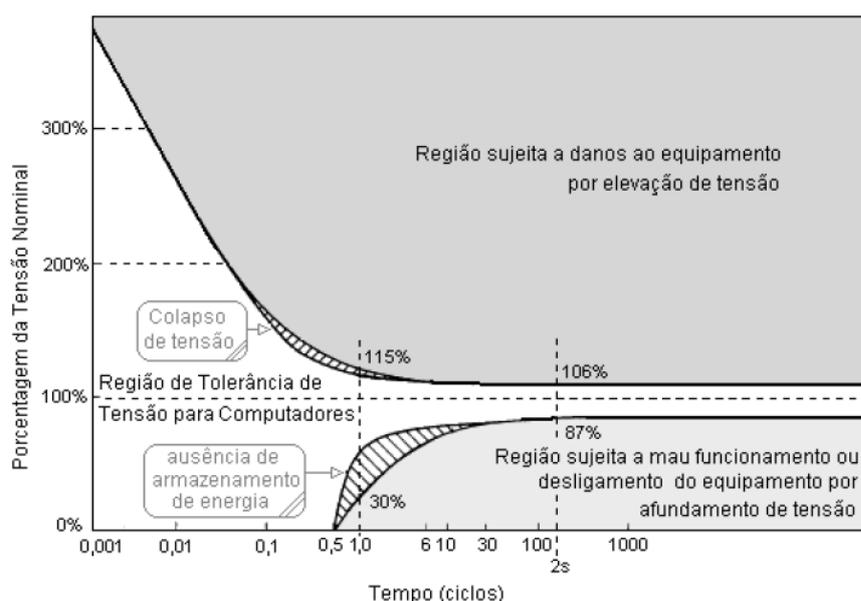
- qualidade de tensão: focada nos desvios de tensão de um padrão ideal. Este padrão ideal seria uma onda de tensão senoidal com amplitude e frequência constantes;
- qualidade de corrente: termo complementar à qualidade de tensão; focada nos desvios de corrente de um padrão ideal. Este padrão ideal, conforme a tensão, seria uma onda de corrente senoidal com amplitude e frequência constantes;
- qualidade de potência: combinação entre a qualidade de tensão e a qualidade de corrente;
- qualidade de fornecimento: combinação da qualidade de tensão com aspectos não-técnicos de interação (atendimento, satisfação do cliente, etc.), entre a rede de fornecimento elétrico e seus consumidores;
- qualidade de consumo: termo complementar da qualidade de fornecimento, enfocando nas responsabilidades do consumidor quanto à correta utilização da energia elétrica.

2.3.1 Regulação Sobre a Qualidade de Energia

Até o presente momento, não existem normas específicas sobre a qualidade de energia elétrica dos inversores de tensão em aplicações automotivas, para tanto o estudo deste trabalho será baseado em conceitos de normas internacionais, como a

norma IEEE 446 (*Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*), (IEEE, 1995), traduzida em “Prática recomendada para sistemas de alimentação de emergência, em aplicações industriais e comerciais”. Os fabricantes de computadores geralmente especificam desvios de tensão momentâneos aos quais seus dispositivos internos podem operar sem sofrer erros ou danos ao equipamento, conforme a curva CBEMA na Figura 11.

Figura 11 - Gráfico da curva CBEMA

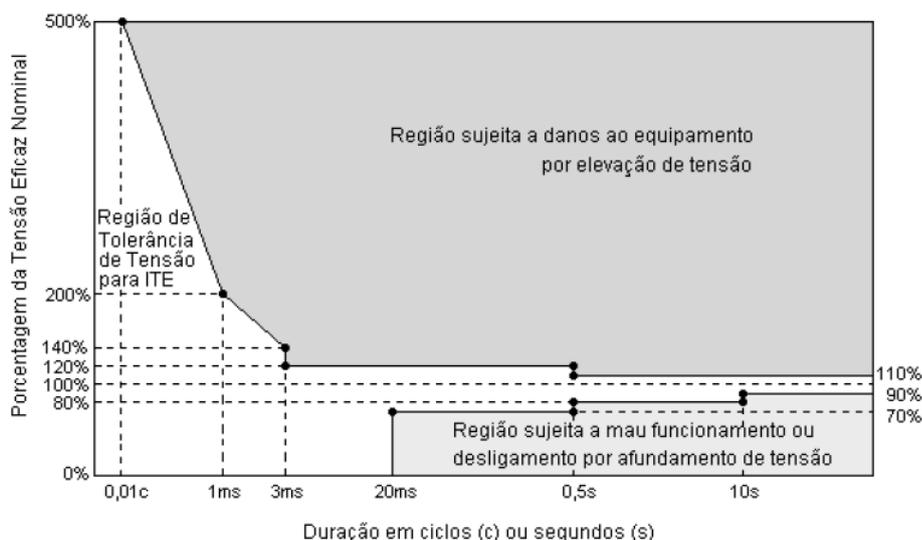


Fonte: Adaptado da norma IEEE 446 (1995).

Segundo Pomilio (2007), a curva CBEMA, ilustra que, se a tensão de alimentação estiver dentro dos limites denominada “região de tolerância”, logo não devem ocorrer mal funcionamento dos equipamentos hora alimentados, entretanto violações destes limites indicados, devem ser evitados, para que não exista a geração de possíveis danos, isto é de fácil compreensão quando visualizamos no gráfico os níveis de tolerância da tensão de 6 % para a sobretensão e de 13 % para subtensão na faixa da “região de tolerância”.

A seguir, pode-se visualizar o gráfico da ITIC, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Gráfico da curva ITIC



Fonte: Adaptado da norma IEEE 446 (1995).

Pomilio (2007) reforça que quanto menor a duração da perturbação, maior a alteração admitida, uma vez que os elementos armazenadores de energia internos ao equipamento devem ser capazes de absorvê-la. Via de regra, quem suporta a alimentação do equipamento na ocorrência de falhas de curta duração são as capacitâncias das fontes de alimentação internas, de modo que, esporadicamente, os equipamentos tendem a suportar tais oscilações dos níveis de funcionamento pré-estabelecidos. Cabe ressaltar, conforme o gráfico da ITIC, Figura 12, que quanto maior o tempo transcorrido deste evento menor será o percentual de tolerância da tensão admitido.

A norma ABNT-NBR 14561 (2000), permite que o fornecimento mínimo atenda as características de um inversor de tensão do tipo que possui em sua saída CA o formato de uma onda quadrada modificada. Este tipo de equipamento possui uma DHT_V entre (15 a 35) % e eficiência de (80 a 95) %. Entretanto a norma americana (KKK-A-1822E *Federal Especification for the "Star-of-Life Ambulance"*, GENERAL SERVICE ADMINISTRATION) (GSA AUTOMOTIVE, 2002), especifica que o fornecimento mínimo atenda as características de um inversor de tensão do tipo que possui em sua saída CA o formato de uma onda senoidal. Este tipo de equipamento possui uma DHT_V entre (1 a 5) % e eficiência de (85 a 95) %.

A norma IEEE 446 (*Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*), (IEEE, 1995), recomenda que a

forma de onda ideal de fornecimento seja senoidal, com uma distorção harmônica total (DHT) de 5 % e uma variação permitida de +/- 0,5 % para a frequência de 60 Hz.

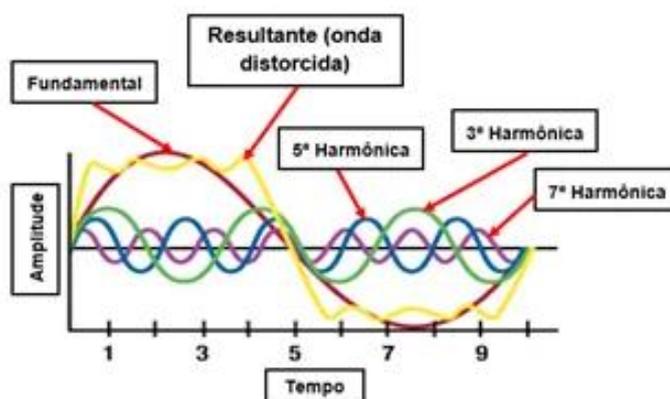
2.4 Harmônicos

Com o aumento gradativo do setor industrial, e com isso o aumento da tecnologia empregada nos seus processos, somado ao crescimento da eletrônica de potência, observa-se o aumento expressivo dos distúrbios gerados na rede elétrica. As cargas não lineares, como conversores estáticos de potência, conversores de frequência, lâmpadas fluorescentes, computadores e qualquer outra carga que trabalhe com correntes não-senoidais, têm causado um aumento significativo no nível de distorção harmônica. (CARVALHO, 2004).

Em favor deste pensamento, pode-se considerar que no passado a grande maioria das cargas eram resistivas, as quais por sua natureza elétrica, não provocam distorções nas fontes geradoras de energia.

Atualmente, no sistema elétrico podem haver dois tipos de cargas conectadas, cargas lineares e cargas não lineares. Uma carga conectada ao sistema pode afetar outras cargas se uma significativa distorção for produzida, principalmente se levarmos em consideração o fato de que cargas não lineares utilizam ondas de tensão senoidais para gerar distorções (DIAS 2002; NOGUEIRA 2011), conforme a Figura 13.

Figura 13 - Fundamental e a resultante das diversas ordens harmônicas



Fonte: Adaptado de Bolotinha (2020).

Conforme Silva (2008), é possível perceber que a natureza e a intensidade dos harmônicos gerados por cargas não lineares dependem de cada carga especificamente, mas três aspectos devem ser considerados gerais, sendo:

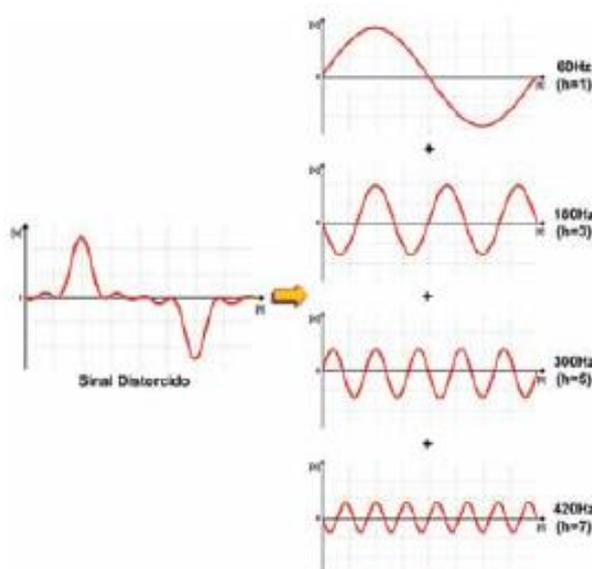
- É um fenômeno contínuo, ou seja, de longa duração;
- Devido ao comportamento similar no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da quase totalidade das cargas, os harmônicos de ordem ímpar são mais frequentes e com maior intensidade e, por isso, geralmente são os causadores de problemas;
- Quanto maior a ordem ou frequência do harmônico menor sua intensidade.

Para Souza e Moreno (2001), os harmônicos são ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras a uma frequência de referência, denominada fundamental. Leão (2014) aponta que a ordem da harmônica é definida por cada múltiplo inteiro da frequência fundamental. A ordem do sinal harmônico significa quantos vezes ela é múltipla da fundamental e com a utilização da equação 2.1, pode-se dividir a frequência múltipla, pela frequência fundamental.

$$h = \frac{h_{múltipla}}{h_{fundamental}} \quad (2.1)$$

No Brasil a frequência fundamental do sistema elétrico é a frequência de 60 Hz, a harmônica de segunda ordem será 120 Hz, a terceira harmônica será 180 Hz, a sétima harmônica será 420 Hz, e a h-ésima harmônica é (h x 60) Hz. Desta forma pode-se dividir os harmônicos em pares e ímpares. A Figura 14 demonstra as interferências das componentes harmônicas em um sinal senoidal.

Figura 14 - Representação da decomposição de um sinal distorcido



Fonte: Adaptado de Paulillo; Ribeiro (2013).

A Figura 14 ilustra a frequência fundamental de 60 Hz, uma onda puramente senoidal, mas pela influência de cargas não lineares, esta onda é distorcida pelas harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem. Predominantemente, os equipamentos em que a alimentação foi projetada como sendo uma onda perfeitamente senoidal, serão bem mais susceptíveis a harmônicos.

Conforme Rashid (2014) a saída de inversores práticos contém harmônicos e a qualidade de um inversor é normalmente avaliada em função dos seguintes parâmetros de performance:

- fator harmônico do n-ésimo harmônico (FH_n);
- distorção harmônica total (DHT);
- fator de distorção (FD).

Estes parâmetros serão abordados na sequência pois são dados significativos que estabelecem os critérios corretos aos quais auxiliam muito na tomada de decisão para a aplicação correta destes equipamentos.

2.4.1 Fator Harmônico de N-ésima Harmônica (FH)

O fator harmônico (da n-ésima harmônica) é uma medida da contribuição individual de uma harmônica, é definido como a expressão 2.2.

$$FH_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}} \quad n > 1 \quad (2.2)$$

onde:

V_{on} - é o valor de tensão eficaz da n-ésima componente harmônica

V_{o1} - é o valor de tensão eficaz da componente fundamental

A componente fundamental do nosso sistema é a própria frequência de 60 Hz, também denominada de primeira harmônica. O FH permite verificar qual o componente que está mais prejudicial ao sistema. Estudos já apontam que as componentes de mais baixa ordem ocasionam maior influência sobre o sinal de origem. Contudo a cerca destas informações percebe-se uma maior atenção as componentes harmônicas de 3ª a 9ª.

2.4.2 Distorção Harmônica Total (DHT)

A distorção harmônica total, que também é apresentada na literatura como taxa de distorção harmônica, do inglês THD (*Total Harmonic Distortion*), define o quanto uma forma de onda está distorcida em relação à componente fundamental. (MARTINS, 2006). Para uma onda puramente senoidal, livre de distorções, o DHT é de 0%.

Como o objetivo do inversor é usar uma fonte de tensão direta para fornecer carga que requer corrente alternada, é útil descrever a qualidade da tensão ou corrente de saída alternativa. A qualidade de uma onda não senoidal pode ser expressa em termos do fator DHT. Supondo que não haja componente CC na saída. (HARTZ, 2001).

A distorção harmônica total, que é uma medida da proximidade do formato entre uma forma de onda e sua componente fundamental, e definida como a expressão 2.3.

$$DHT = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2} \quad (2.3)$$

Com base na DHT, calcula-se a distorção harmônica total da tensão (DHT_V) e a distorção harmônica total da corrente (DHT_I), conforme a expressão 2.4 e 2.5.

$$DHT_V = \sqrt{\frac{V_{on}^2 - V_{o1}^2}{V_{o1}^2}} \quad (2.4)$$

$$DHT_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2,3}^{\infty} I_{on}^2}{I_{o1}^2}} \quad (2.5)$$

onde:

I_{o1} - é o valor de corrente eficaz da componente fundamental

I_{on} - é o valor de corrente eficaz da n-ésima componente harmônica

2.4.3 Fator de Distorção (FD)

A DHT dá o conteúdo harmônico total, mas não mostra o nível de cada componente harmônica. Em algumas aplicações um filtro na saída do inversor é instalado, fazendo com que as harmônicas de ordem superior sejam atenuadas com

mais eficiência. Deste modo, é importante conhecer a frequência e a amplitude de cada harmônica. Para isso o (FD), fator de distorção, indica a quantidade de distorção harmônica que resta em uma forma de onda específica após as harmônicas dessa forma de onda terem se submetido a uma atenuação de segunda ordem (isto é, terem sido divididas por n^2). Assim, o fator de distorção é uma medida da eficácia na redução de harmônicas indesejáveis sem ser preciso especificar os valores de um filtro de carga de segunda ordem, e é definido pela expressão 2.6. (HARTZ, 2001).

$$FD = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{On}}{n^2}\right)^2} \quad (2.6)$$

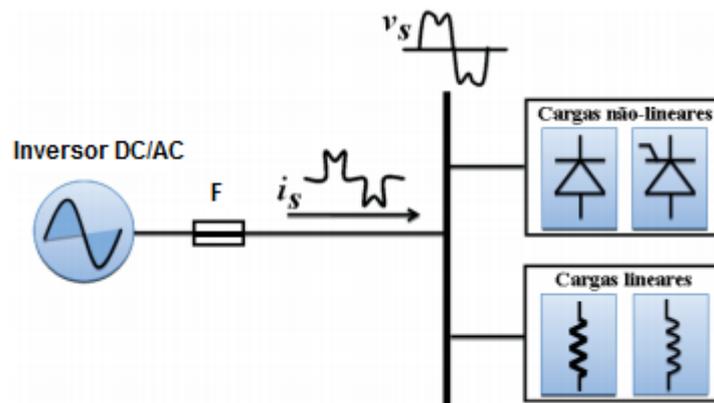
O FD de uma componente harmônica individual (ou n -ésima) é definido de acordo com a expressão 2.7.

$$FD_n = \frac{V_{On}}{V_{o1} n^2} \quad n > 1 \quad (2.7)$$

2.4.4 Cargas Produtoras de Harmônicos

Para compreender os aspectos relacionados aos efeitos harmônicos é importante realizar uma análise das cargas produtoras destes fenômenos tão indesejados no sistema elétrico. Para Figueiredo (2006), a primeira ação a se tomar quando nos referimos a cargas é a de separá-las em lineares e não lineares. A Figura 15 demonstra a topologia de alimentação e a divisão das cargas.

Figura 15 - Representação dos dois tipos de cargas e os dispositivos



Fonte: Adaptado de Campanhol; Malvezzi; Silva (2013).

As cargas lineares, basicamente, são compostas por elementos como resistores, capacitores e indutores (FIGUEIREDO, 2006). Galhardo e Pinho (2004) apontam que em cargas puramente resistivas, a corrente é diretamente proporcional à tensão e os efeitos harmônicos não são levados em consideração pois o objetivo principal é o aquecimento.

Conforme Leão (2014), as cargas não lineares podem ser divididas em convencionais e chaveadas. As cargas convencionais não utilizam interruptores estáticos ou eletrônicos, são exemplos os transformadores, as máquinas com núcleo de ferro magnético, entre outros. Para objeto de estudo não será abordado este tipo de carga, pois o mesmo não está presente no veículo de emergência. As cargas chaveadas são dispositivos que basicamente operam em modo de condução e bloqueio fazendo o uso de componentes discretos como transistores, tiristores e diodos. Os equipamentos médicos como, cardioversor, monitor multiparâmetro, bomba de infusão, se enquadram neste tipo de carga, justamente por terem fontes chaveadas AC/DC na entrada de alimentação.

2.5 Trabalhos Correlatos

Realizou-se a pesquisa de literatura de forma a coletar outros trabalhos destinados ao estudo da qualidade de energia elétrica de inversores de tensão de uso automotivo, principalmente na aplicação em veículos de urgência e emergência, entretanto não foram encontrados estudos com esta aplicação. Alguns trabalhos estudam as metodologias de modulação, como as aplicadas neste estudo, com a finalidade de elaborar um projeto prático de um inversor de tensão. Outros trabalhos mais similares a este estudo são artigos voltados a qualidade de energia e ao comportamento destes equipamentos quando destinados a micro geração.

Galhardo e Pinho (2005) realizaram uma análise da influência da forma de onda de alimentação sobre cargas não-lineares em sistemas de geração de pequeno porte. Os autores realizaram medições em cargas com fontes chaveadas, alimentadas por inversores com forma de onda quadrada, quadrada modificada e senoidal, realizando análises do ponto de vista da conservação e da qualidade da energia elétrica.

Os autores concluíram que um dos fatores determinantes para a escolha do inversor de tensão é o tipo de aplicação ou a carga a ser suprida, associado ao custo

do equipamento. Para a alimentação de cargas não lineares o inversor de onda quadrada apresentou fator de potência mais alto, menor consumo de energia do banco de baterias e uma menor THD_i, porém, operando a vazio é o que mais demanda potência ativa. Entretanto para a alimentação de lâmpadas fluorescentes compactas, ocorre uma diminuição da iluminância. Notou-se, que o inversor de onda modificada não conseguiu dar partida nas lâmpadas devido à alta corrente de pico, ocasionando um maior valor de energia reativa no inversor.

Silva, Camelon, Saavedra e Santos (2003), fizeram um estudo da iluminação baseada em sistemas fotovoltaicos, realizando uma análise de desempenho sob condição de tensão não-senoidal. Os autores investigaram e analisaram a influência das formas de onda de três inversores de tensão, onda quadrada, onda quadrada modificada e onda senoidal, na condição de alimentação de lâmpadas fluorescentes compactas e tubulares com reator eletromagnético e eletrônico.

O estudo concluiu que o inversor de onda quadrada tem a vantagem do menor consumo da fonte geradora e menor custo de aquisição, mas em contrapartida possui perda de intensidade luminosa, devido a sua característica de fornecer tensão média à carga. Uma alternativa é a utilização do inversor de tensão de onda quadrada modificada, que melhora a intensidade luminosa, pois controla a tensão rms fornecida à carga, mas com um acréscimo no custo de aquisição do equipamento.

Mendes, Paschoareli e Faria (2002), verificaram o impacto da utilização de inversores em sistemas de geração distribuída sobre equipamentos rurais. Os autores realizaram uma compilação das fontes de distorção harmônicas, bem como suas definições e os efeitos nas cargas mais comuns nos sistemas elétricos rurais.

O estudo aponta as características do inversor de onda quadrada como sendo o mais rudimentar, com uma série infinita de harmônicas ímpares. Em contrapartida, o inversor senoidal possui a forma de onda da tensão no formato de uma senóide, similar à rede elétrica da concessionária, tendo como característica a geração de harmônicas ímpares, múltiplas da frequência de chaveamento. O estudo ainda aborda as fontes de distorção harmônica, como conversores e retificadores com filtros capacitivos e os efeitos nos componentes do sistema elétrico, como motores e geradores, transformadores, cabos de alimentação, capacitores e equipamentos eletrônicos. Por fim, os autores reforçam a importância do conhecimento destes efeitos para uma correta aplicação dos inversores, visto em muitos casos as grandes

distâncias que estas localidades rurais estão em relação aos grandes centros urbanos, impactando em uma dificuldade na manutenção.

3 METODOLOGIA

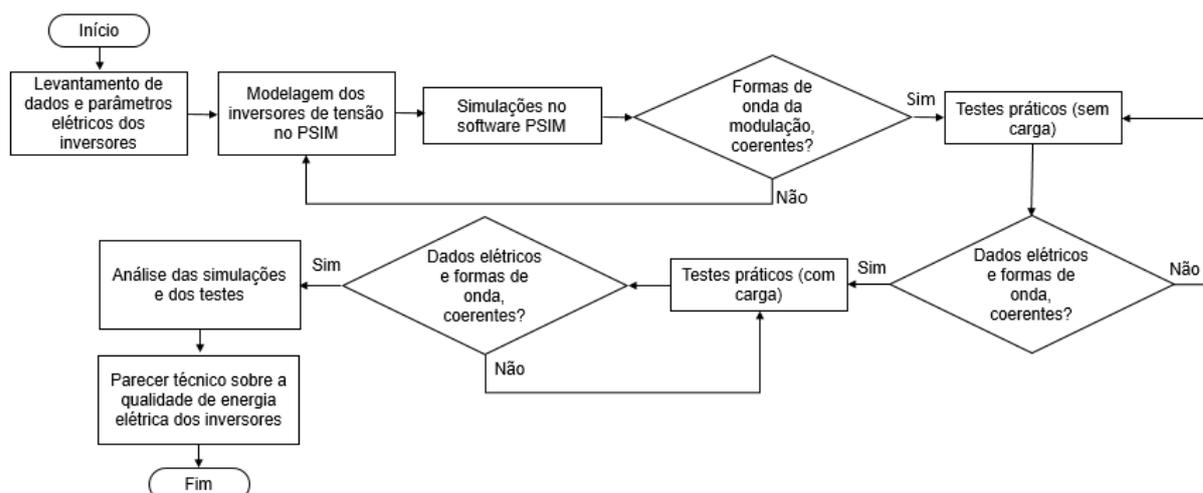
Neste trabalho é realizado um estudo da qualidade de energia elétrica dos inversores de tensão monofásicos de uso automotivo aplicados em ambulâncias de suporte avançado (SA). Estes veículos disponibilizam em seu interior, uma tensão alternada de 110 V a uma frequência de 60 Hz, para a alimentação de equipamentos de uso médico. Esta energia é fornecida por uma bateria auxiliar de 12 Vcc e convertida para 127 Vca pelo dispositivo inversor de tensão.

A metodologia que será empregada neste estudo é baseada nas normas ABNT NBR 14561:2000, KKK-A-1822E (GSA AUTOMOTIVE, 2002) e IEEE 446 (IEEE, 1995).

3.1 Apresentação Geral

Serão testados dois inversores, um de onda quadrada modificada e outro de onda senoidal, para comparação da qualidade de energia diante das duas técnicas de modulação encontradas nos inversores utilizados embarcados em veículos de suporte avançado. A metodologia proposta neste trabalho foi organizada em formato de fluxograma, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O início do fluxograma acontece a partir da aquisição dos equipamentos e levantamento dos dados técnicos, na etapa seguinte é realizada a modelagem das duas topologias com as posteriores simulações. Na etapa prática do estudo é

realizado os ensaios práticos nos dois equipamentos, no modo sem carga e com carga. No final é realizado uma análise dos dados obtidos tanto nas simulações como nos testes práticos. Por fim o estudo fornece um parecer técnico da qualidade de energia elétrica destes dois inversores de tensão.

3.2 Dados e Parâmetros Elétricos dos Equipamentos

Para elaboração dos testes práticos, foram adquiridos dois inversores de tensão monofásicos, do mesmo modelo e fabricante, apresentados na Figura 17. Este cuidado foi tomado para que a comparação técnica na etapa dos ensaios práticos fosse a mais real e justa possível em termos de tecnologia embarcada.

Figura 17 - Inversores de tensão adquiridos para os testes



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A diferenciação visual entre o inversor de onda quadrada modificada da Figura 17A para o inversor de onda senoidal da Figura 17B, se dá pela diferença nas dimensões dos equipamentos e pela etiqueta superior de identificação. Entretanto realizando uma abordagem mais técnica, através da remoção da tampa de fechamento dos equipamentos, foi observada a etapa de filtragem final (indutor toroidal e capacitor) que o inversor senoidal possui e o inversor de onda quadrada modificada não, bem como a modulação SPWM (placa eletrônica EGS-3). As informações técnicas dos equipamentos estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dos inversores de tensão monofásicos

Inversores de Tensão Monofásicos

Fabricante	Hayonik	
Modelo	PW11-2	PW21-1
Forma de onda na saída	Onda quadrada modificada	Onda Senoidal
Potência nominal	1000 W	
Potência de pico	2000 W	
Tensão de entrada	12 Vcc \pm 12 %	
Tensão de saída	127 Vca \pm 10 %	
Frequência	60 Hz \pm 3 Hz	60 Hz \pm 2 Hz
Eficiência	\geq 80 %	\geq 86 %
Cabo de alimentação DC	35mm ²	
Dimensões (C x L x A)	(213 x 147 x 79) mm	(289 x 147 x 79) mm
Peso	1,940 kg	2,500 kg

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

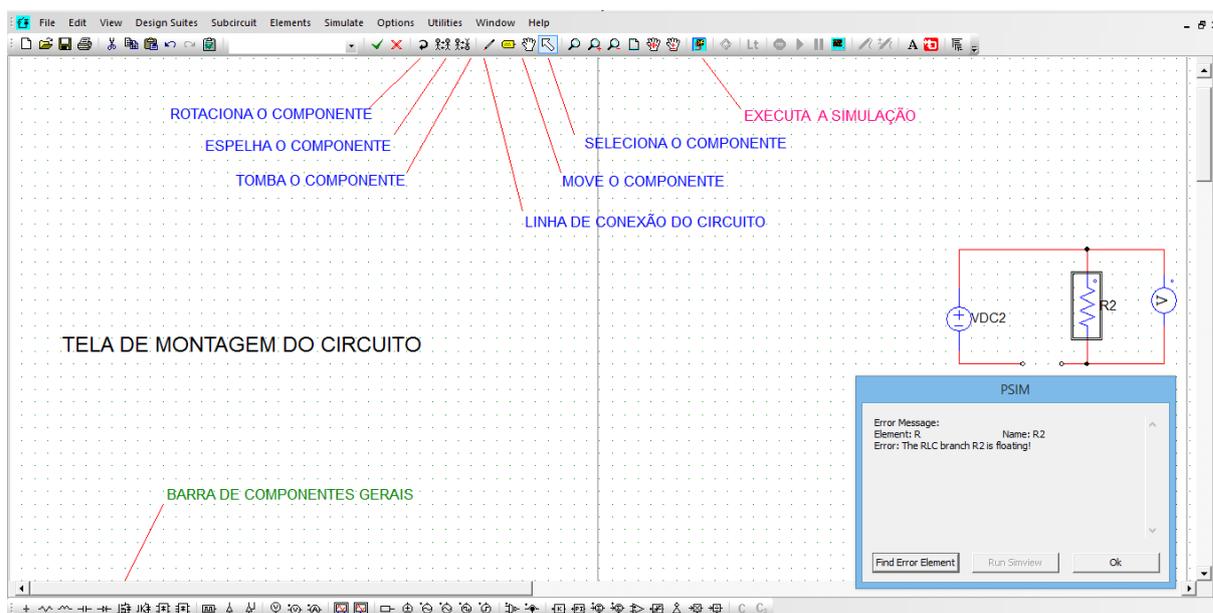
Algumas informações são idênticas para ambos equipamentos, conforme demonstra a Tabela 1. Entretanto, os pontos que mais se destacam pela não similaridade são:

- a diferença no formato de onda na saída;
- a eficiência dos equipamentos;
- a variação de tensão e frequência na saída.

3.3 Modelagem no Software PSIM

Para elaboração da modelagem e posterior simulação da estrutura de um inversor CC / CA, foi utilizado o software PSIM (*Power Simulator*), versão 11.1.3 de 2018. Este software permite a montagem da etapa de potência bem como a etapa de geração dos sinais de modulação. Na Figura 18 demonstra a tela inicial do programa (POWERSIM, 2018).

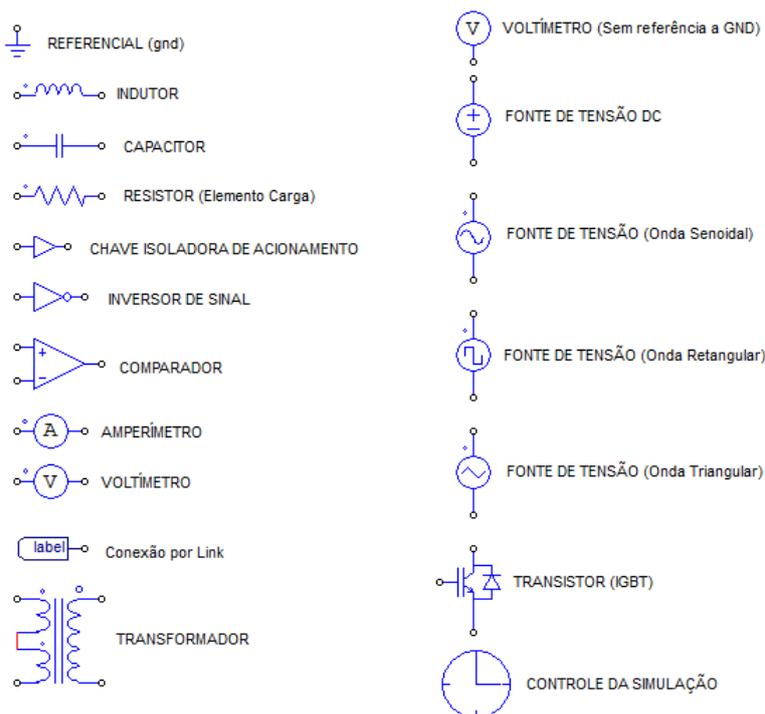
Figura 18 – Tela inicial do software PSIM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 18 identifica as principais funcionalidades do software, que dispõe de um ambiente amigável, pois todos os ícones possuem a informação da função se o cursor estiver sobre o mesmo. Na Figura 19 é fornecido a identificação de todos os componentes utilizados na montagem. (POWERSIM, 2018).

Figura 19 – Identificação dos componentes da modelagem no PSIM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Para a execução da simulação, é necessário que todos os componentes inseridos na tela de trabalho estejam conectados, caso isto não ocorra por uma eventual falha na montagem do circuito, o próprio software, abrirá uma janela, informando o erro e o tag de identificação do componente que está desconectado, como ilustrou a Figura 18, canto direito inferior, para o resistor (R2).

O ícone controle da simulação, permite que seja parametrizado o tempo da janela de análise do ambiente de simulação chamado Simview. Neste trabalho, as simulações visam o estudo da topologia dos inversores, deste modo não é levado em consideração a retificação do sinal alternado após o transformador elevador, pela ponte de diodos, bem como a estrutura de ponte H para o fornecimento de tensão alternada a carga. Na simulação, o software considera que os componentes são ideais, entretanto, para um correto funcionamento, alguns critérios foram adotados, conforme abaixo:

- tensão da fonte (Bateria): 12 Vcc
- relação de transformação do transformador: 1/20
- tensão de saída: aproximadamente 150 Vca
- frequência nominal: 60 Hz
- frequência de modulação: 20 kHz
- taxa de modulação: entre 0 e 1
- carga resistiva: 12 Ω

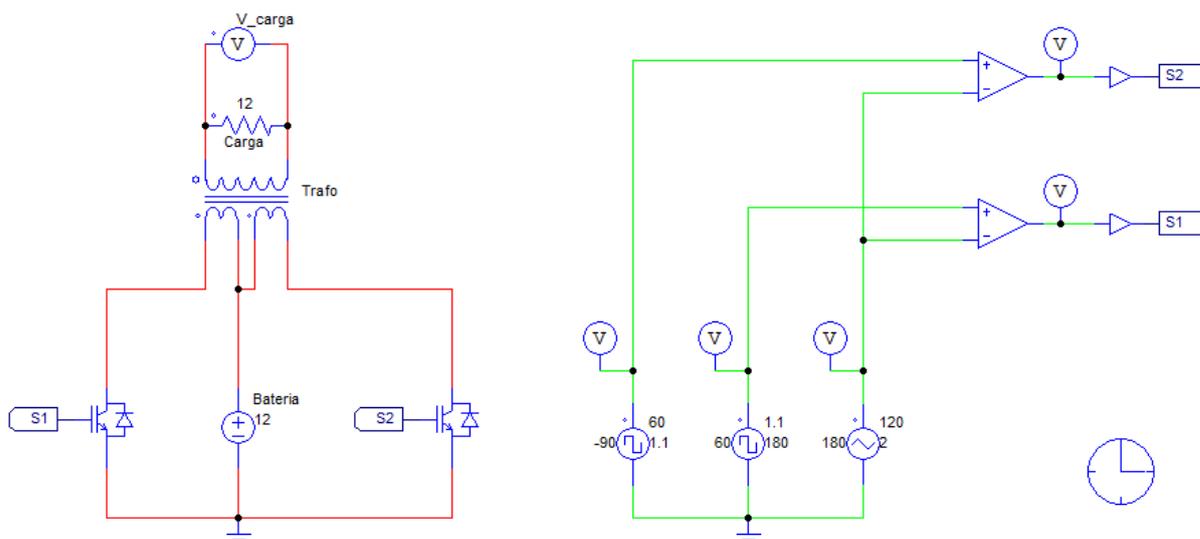
Desta forma é importante ressaltar que o software adota um modelo de transformador ideal, muito diferente de um transformador real, pois não estão inseridas as características elétricas, como indutância de dispersão, resistências e a magnetização, entre outros fenômenos.

Todas as modelagens são baseadas na modulação a três níveis, obtendo desta forma os seguintes níveis de tensão +V, 0 (zero) e -V.

3.3.1 Modelagem da Topologia *Push-Pull* com Modulação PWM Linear

Nesta etapa, foi montado, com o auxílio do software PSIM, a topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação PWM linear, conforme a Figura 20, conforme (RASHID, 2014; e AHMED, 2000).

Figura 20 - Modelagem da topologia *push-pull* com modulação PWM linear



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

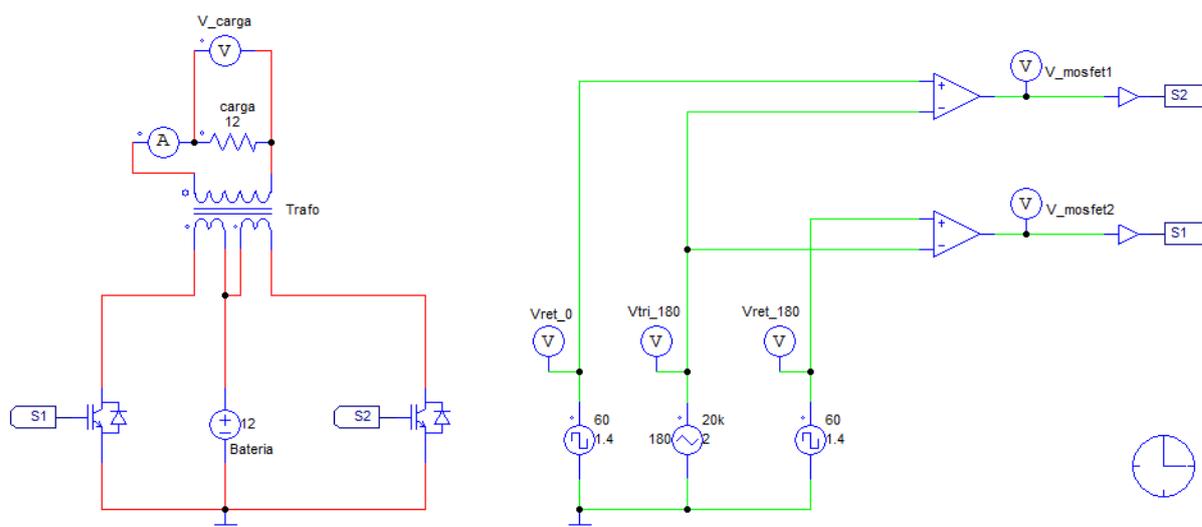
O circuito de potência, é composto por 2 transistores do tipo mosfet, uma fonte geradora CC de 12 V, um transformador com uma bobina no primário, duas bobinas no secundário e uma carga resistiva de 12 Ω . Nesta topologia, o transformador é conectado invertido de sua forma convencional, como demonstra a Figura 20. A geração dos sinais de comando para a comutação das chaves semicondutoras é realizada pela comparação de dois sinais de referência (ondas quadradas) uma com -90° e a outra com 180° , comparadas com uma onda portadora triangular.

A frequência das ondas de referência é a mesma esperada na saída do inversor de tensão, que é de 60 Hz. A amplitude da onda de referência é de 1,1 V e a da onda portadora é de 2 V, desta forma o índice de modulação é de 0,55. A relação de transformação do transformador é de 1/20, sendo 1 espira no primário, 20 espiras no secundário e 20 espiras no terciário, deste modo, obtém-se a elevação da tensão de 12 Vcc para aproximadamente 200 Vca. A característica de tensão alternada na saída do transformador é devido ao tipo de chaveamento na bobina secundária e terciária do transformador, que recebem a conexão a bateria de 12 Vcc.

3.3.2 Modelagem da Topologia *Push-Pull* com Modulação UPWM

Nesta etapa, foi montado, com o auxílio do software PSIM, a topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação UPWM, conforme a Figura 21, conforme (RASHID, 2014; e AHMED, 2000).

Figura 21 - Modelagem da topologia *push-pull* com modulação UPWM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

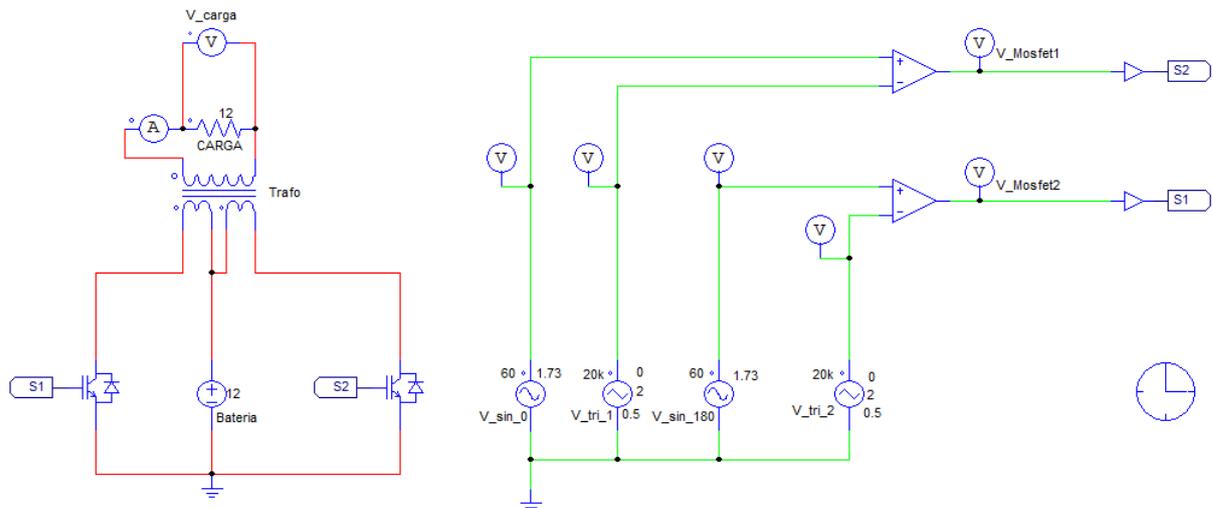
Igualmente a topologia anterior, o circuito de potência se mantém o mesmo. A geração dos sinais de comando para a comutação das chaves semicondutoras é realizada pela comparação de dois sinais de referência (ondas quadradas) defasados 180° entre si, com uma onda portadora triangular.

A frequência das ondas de referência é a mesma esperada na saída do inversor de tensão, que é de 60 Hz. Em contrapartida a frequência da onda portadora é de 20 kHz. A amplitude da onda de referência é de 1,4 V e a da onda portadora é de 2 V, desta forma o índice de modulação é de 0,7. A relação de transformação do transformador também se mantém a mesma 1/20.

3.3.3 Modelagem da Topologia *Push-Pull* com Modulação SPWM

Dando continuidade à etapa anterior, foi modelado a topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação SPWM, conforme a Figura 22.

Figura 22 - Modelagem da topologia *push-pull* com modulação SPWM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

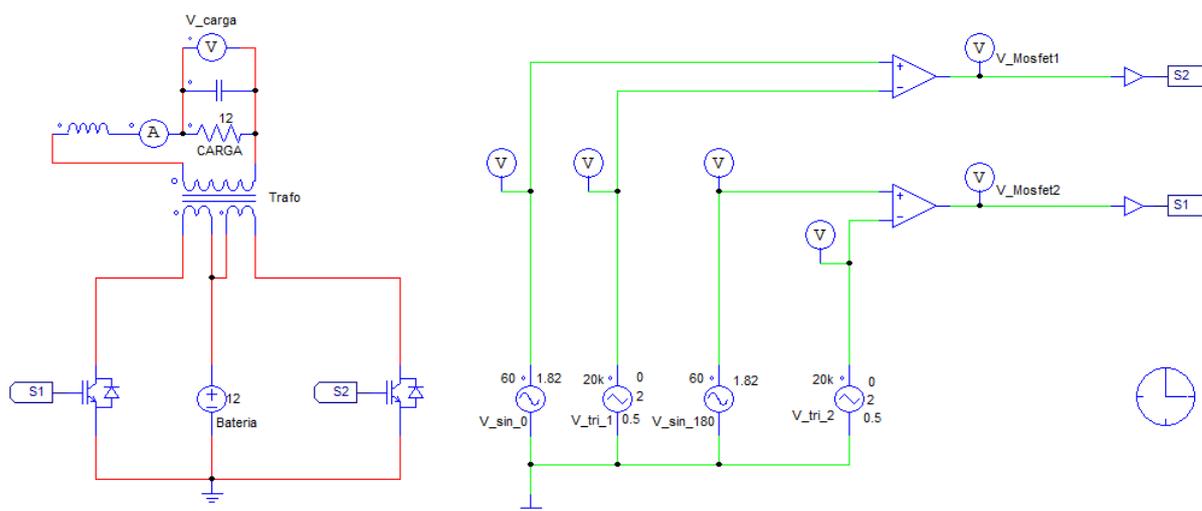
A etapa de potência é igual à vista anteriormente. A diferença se dá, somente na geração dos sinais de comando, para a comutação das chaves semicondutoras, Figura 22. Agora passa a ser realizada pela comparação de dois sinais de referência (ondas senoidais) defasados 180° entre si, com uma onda portadora triangular.

A frequência das ondas de referência é a mesma esperada na saída do inversor de tensão, que é de 60 Hz. Em contrapartida a frequência da onda portadora é de 20 kHz. A amplitude da onda de referência é de 1,73 V e a da onda portadora é de 2 V, desta forma o índice de modulação é de 0,86. A relação de transformação do transformador também se mantém a mesma 1/20.

3.3.4 Modelagem da Topologia *Push-Pull* com Modulação SPWM-LC

Nesta etapa foi mantido a modulação SPWM, mas inserido o filtro LC passa baixa, composto de indutor e capacitor, nos terminais de saída.

Figura 23 - Modelagem da topologia *push-pull* com modulação SPWM-LC



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Este filtro, possui duas particularidades, por sua característica de passa baixa. A primeira característica é a de deixar a forma de onda no formato de uma senóide, já a segunda característica, é a de atenuar consideravelmente as amplitudes das harmônicas de ordem 9^a em diante, mas com impacto significativo na frequência de modulação em 20 kHz.

3.4 Testes Práticos nos Inversores de Tensão – sem Carga e com Carga

Para a execução deste trabalho, foi utilizado um multímetro digital do fabricante Minipa, modelo ET-1649 com leitura *true rms* de tensão alternada, necessária para a leitura da tensão eficaz disponibilizada nos terminais de saída do equipamento, um multímetro digital do fabricante Minipa, modelo ET-1639A, para monitoramento da tensão da bateria automotiva, um osciloscópio digital de dois canais, do fabricante Tektronix, modelo TBS1102B de 100 MHz com a função FFT que possibilita a leitura dos componentes harmônicos, e um analisador de qualidade de energia do fabricante Fluke, modelo 43B, para complemento das análises, devido a qualidade técnica deste equipamento.

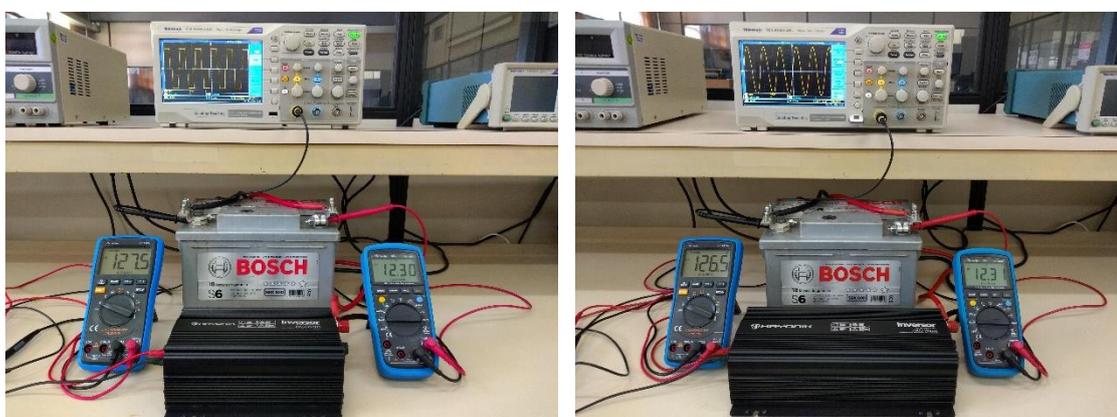
Como fonte geradora CC foi utilizada uma bateria do tipo automotiva de 12 V com capacidade de 60 Ah, disponível no instante do teste. Para garantir um fornecimento de energia CC próximo do ideal, foi utilizado um carregador de bateria automotiva, no intervalo de cada medição.

A ordem dos testes, visando a utilização de um número reduzido de instrumentos de medição e leitura, foi com um modelo de cada vez. Primeiro com o inversor de onda quadrada modificada e, por segundo, com o inversor de onda senoidal.

3.4.1 Consumo da Fonte CC com o Inversor Desligado

Neste teste o objetivo é medir o consumo da bateria automotiva estando os inversores de tensão em modo desligado (botão na posição off), conforme a Figura 24.

Figura 24 - Inversor de tensão no teste de consumo em stand-by



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O multímetro da esquerda conectado em série ao cabo de alimentação positivo, indicará o consumo de corrente elétrica em mA e o multímetro da direita conectado em paralelo aos terminais da bateria, indicará a tensão nominal em Volts, da fonte geradora. A Figura 24 a esquerda demonstra o inversor de tensão de onda modificada e a direita o inversor de tensão senoidal.

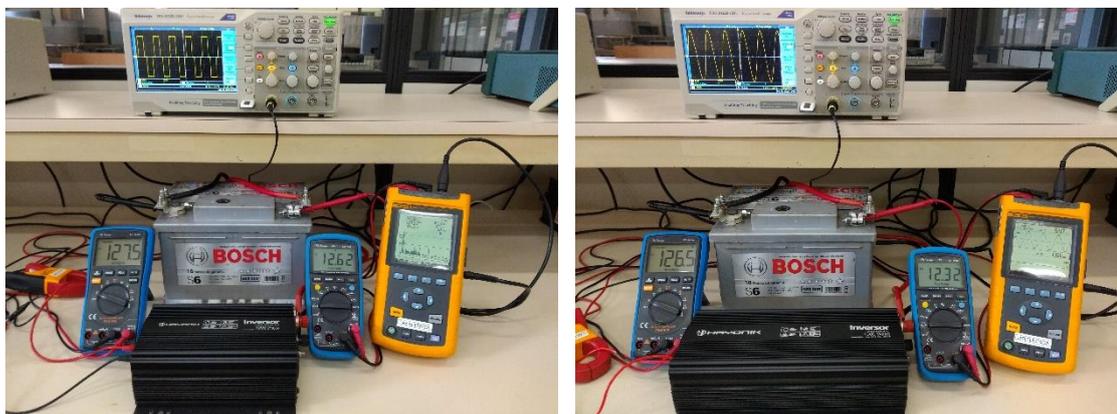
3.4.2 Formas de Onda, Tensão, Espectro da Amplitude e de Fase

Para execução deste teste, Figura 25, e dos demais na sequência indicada neste estudo, o interruptor (*on/off*) do inversor está na posição (*on*), inversor no estado ligado. O objetivo é verificar os seguintes parâmetros sem carga, para ambos inversores de tensão, como:

- tensão nominal rms;

- frequência nominal;
- forma de onda da tensão;
- espectro harmônico.

Figura 25 - Inversores de tensão no teste com e sem carga



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 25 ilustra os equipamentos em bancada de testes, para a realização dos ensaios práticos, demonstrando o posicionamento dos instrumentos de medição, aplicável à ambos inversores. O multímetro a esquerda indicará a leitura de tensão (V_{cc}) da bateria automotiva, sendo que este instrumento está conectado em paralelo aos bornes da bateria (positivo e negativo). O multímetro a direita indicará a leitura de tensão (V_{ca}) da saída do inversor de tensão sendo que este instrumento está conectado em paralelo aos terminais de saída do inversor. Nesta mesma saída estará conectado o canal 1 do osciloscópio e o analisador Fluke.

Na próxima etapa dos testes, mantendo os critérios até aqui adotados, será conectada uma carga linear e outra carga não linear a saída dos inversores de tensão, com o objetivo de registrar dados numéricos e gráficos. Nesta situação de teste com carga, o alicate amperímetro do analisador Fluke será utilizada, conforme pode-se observar na Figura 25.

3.5 Análise dos Resultados

Neste item o objetivo é verificar os dados obtidos com as simulações, verificando qual método é aplicado aos dois tipos de inversores de tensão, com base nas formas de onda da saída e dos componentes harmônicos gerados na topologia push-pull com modulação PWM linear, UPWM, SPWM e SPWM-LC.

Outra informação importante será obtida através dos ensaios práticos, que demonstram parâmetros elétricos importantes para a comparação e orientação de qual inversor de tensão possui uma melhor qualidade de energia elétrica.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o propósito de realizar um estudo da qualidade de energia elétrica dos inversores de tensão monofásicos de uso automotivo aplicados em ambulâncias de suporte avançado (SA), foram realizadas modelagens e testes práticos. Os gráficos das simulações e dos testes práticos foram disponibilizados e analisados seguindo as normas indicadas neste trabalho. A partir destes resultados, foram evidenciadas as diferenças técnicas, possibilitando desta maneira, uma melhor orientação quanto ao emprego destes equipamentos.

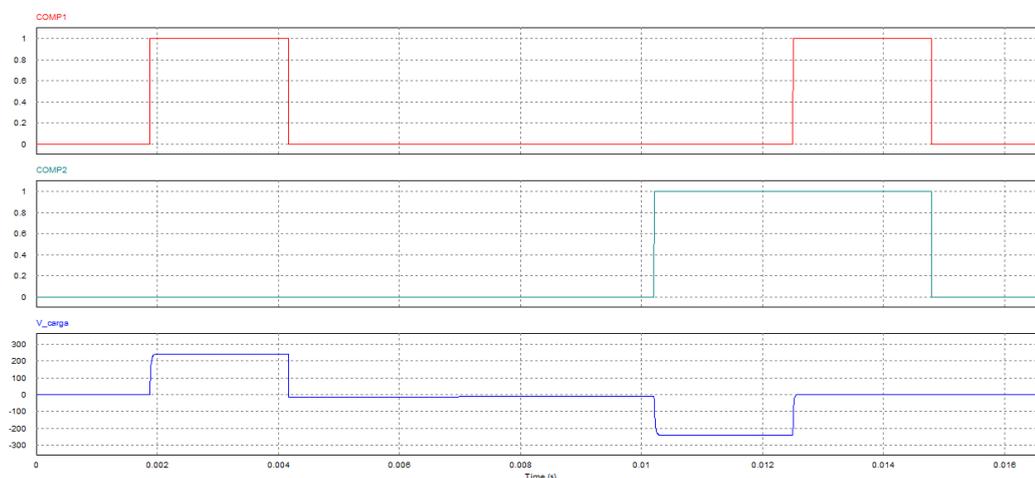
4.1 Simulações no Software PSIM

Nesta etapa foi realizado a modelagem das duas topologias propostas, seguindo os dados e parâmetros informados anteriormente na metodologia. A frequência de saída dos inversores de tensão em estudo é de 60 Hz, desta forma o período que corresponde a um ciclo de trabalho fica em aproximadamente 0,016667 s correspondente a 16,667 ms.

4.1.1 Simulação da Topologia *Push-Pull* com Modulação PWM Linear

Nesta etapa foram executadas simulações com o auxílio do software PSIM na topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação PWM linear, conforme a Figura 26.

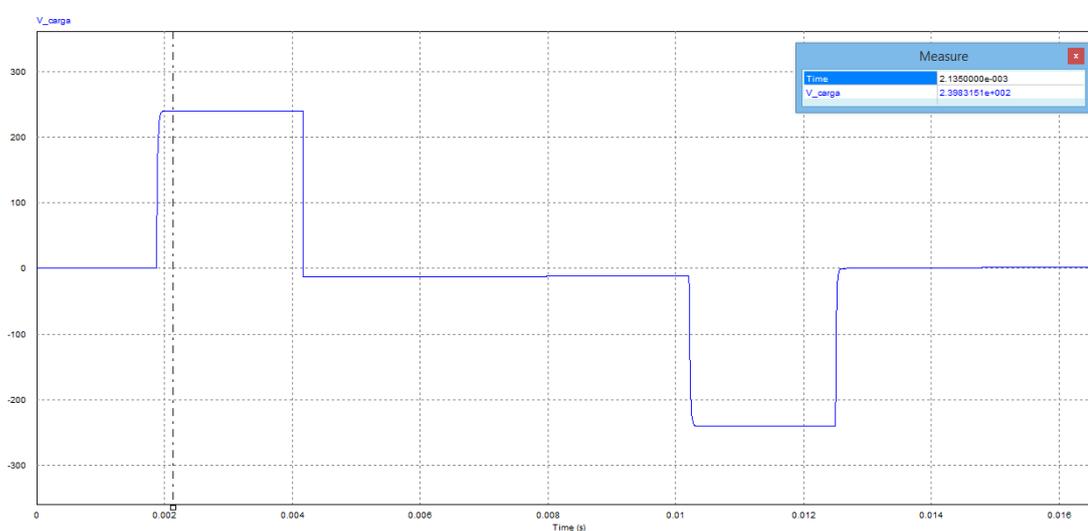
Figura 26 – Sinais dos pulsos PWM e a forma de onda da tensão de saída



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 26, ilustra as formas de onda geradas na tela do simulador PSIM. Em vermelho (V_{mosfet1}) é representado a geração dos pulsos PWM que variam de 0 a 1, responsáveis pelo acionamento do primeiro transistor. Em verde (V_{mosfet2}) é representado a geração dos pulsos PWM que variam de 0 a 1, responsáveis pelo acionamento do segundo transistor. E como consequência deste chaveamento que opera em alta frequência é gerador um sinal (V_{carga}), representado graficamente na cor azul, pelos componentes positivos, nulos (zeros) e negativos. Para uma melhor visualização da forma de onda da tensão na carga, foi gerador o gráfico da Figura 27.

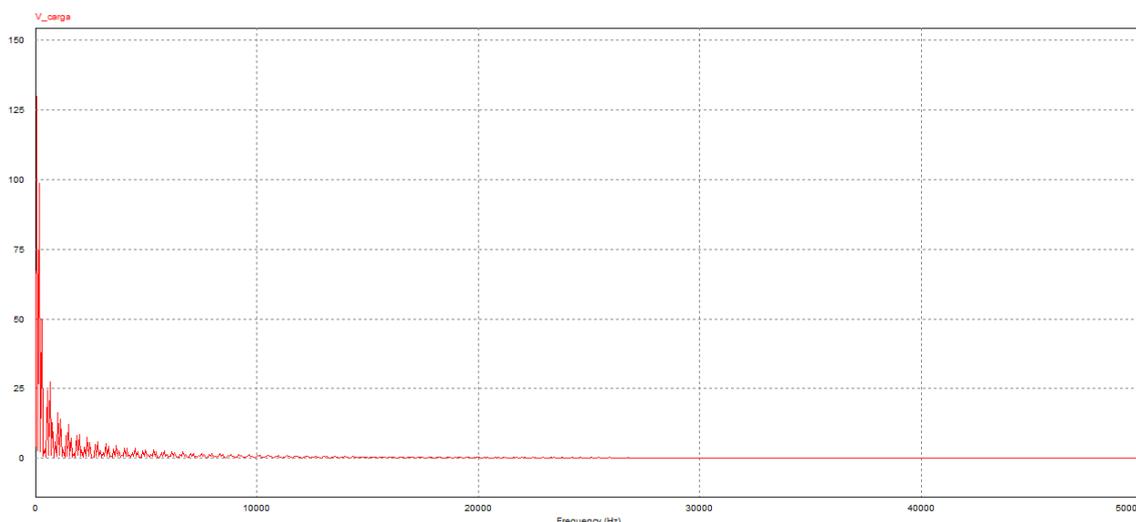
Figura 27 – Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

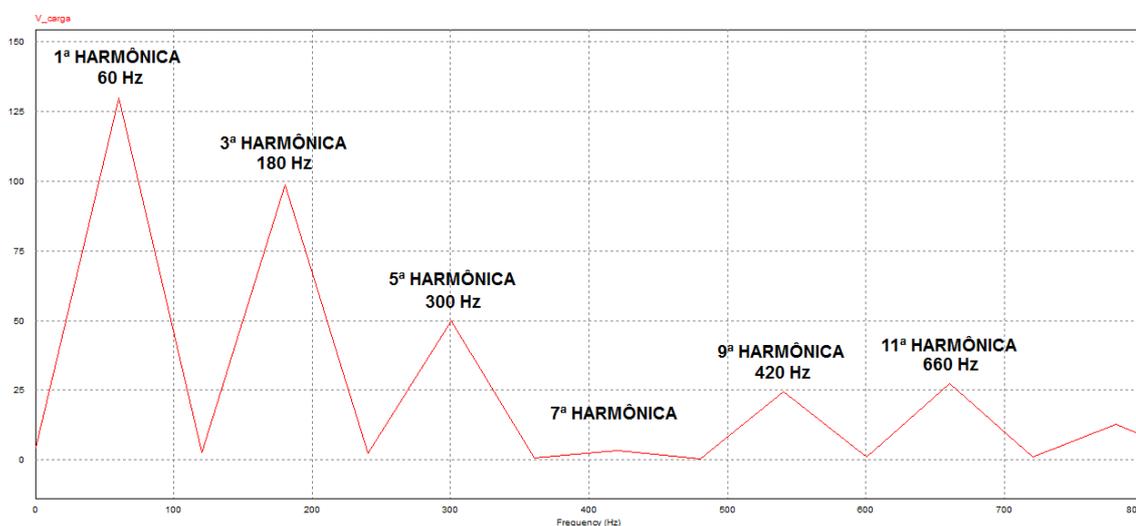
A Figura 27 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abscissas, os relativos ao tempo em segundos. Para uma tensão da fonte de 12 Vcc, foi gerado uma tensão na saída de 239 Vca rms.

Com a função FFT (Transformada Rápida de Fourier) do software PSIM foi possível gerar o gráfico com as distorções harmônicas, ilustradas nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Espectro harmônico, para *push-pull* com modulação PWM linear

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 28 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abscissas, os relativos a frequência em Hertz. Neste gráfico percebe-se a presença dos harmônicos de baixa ordem.

Figura 29 - Zoom do espectro harmônico, *push-pull* com modulação PWM linear

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como complemento à Figura 28 ilustrada anteriormente, foi alterado o eixo das ordenadas, para uma melhor resolução das componentes harmônicas de mais baixa ordem, conforme a Figura 29. Observa-se a frequência fundamental (60 Hz), seguida da 3ª a 11ª harmônicas, com amplitudes de tensão significativas, padrões deste tipo de modulação.

Com as informações gráficas obtidas, foi possível extrair dados e exibi-los conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Harmônicas da modulação com PWM linear

Modulação	Amplitude da harmônica (V)								
	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	20 kHz	40 kHz	60 kHz
PWM	128,5	97,8	49,5	32,8	24,4	27,5	0,32	0,11	0,03

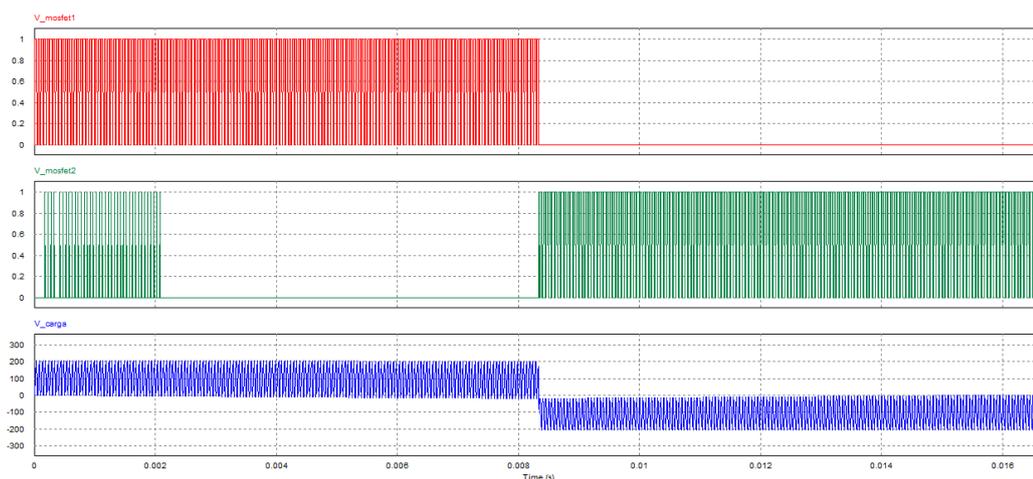
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Tabela 2, demonstra as significativas amplitudes dos componentes harmônicos de mais baixa ordem, com valores bem expressivos, para a 3^a a 11^a componentes. Em contraponto, não ocorre o surgimento de componentes nas altas frequências, justamente pela característica desta modulação.

4.1.2 Simulação da Topologia *Push-Pull* com Modulação UPWM

Nesta etapa foram executadas simulações com o auxílio do software PSIM na topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação UPWM, conforme a Figura 30.

Figura 30 – Sinais dos pulsos PWM e a forma de onda da tensão de saída



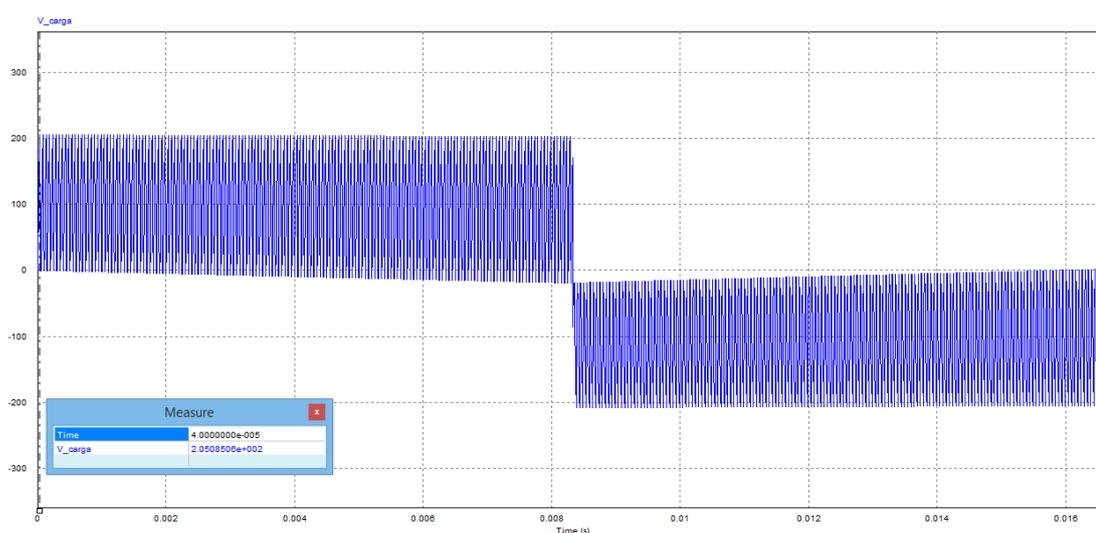
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 30, ilustra as formas de onda geradas na tela do simulador PSIM. Em vermelho (V_{mosfet1}) é representado a geração dos pulsos PWM que variam de 0 a 1, responsáveis pelo acionamento do primeiro transistor. Em verde (V_{mosfet2}) é

representado a geração dos pulsos PWM que variam de 0 a 1, responsáveis pelo acionamento do segundo transistor. E como consequência deste chaveamento que opera em alta frequência é gerado um sinal (V_{carga}), representado graficamente na cor azul, pelos componentes positivos, nulos (zeros) e negativos.

Para uma melhor visualização da forma de onda da tensão na carga, foi gerado o gráfico da Figura 31.

Figura 31 – Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms

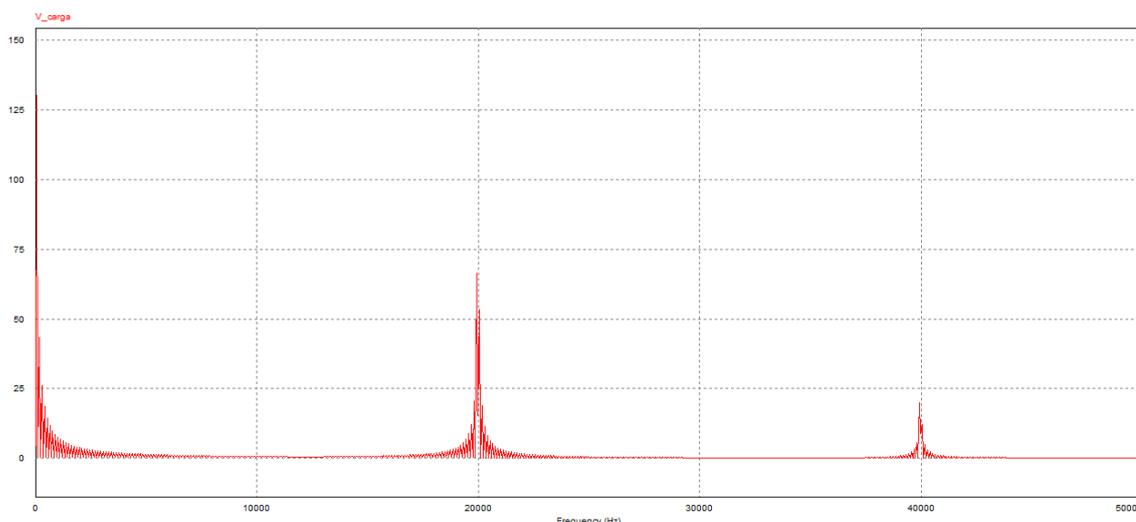


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 31 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abscissas, os relativos ao tempo em segundos. Para uma tensão da fonte de 12 Vcc, foi gerado uma tensão na saída de 205 Vca rms.

Com a função FFT (Transformada Rápida de Fourier) do software PSIM foi possível gerar o gráfico com as distorções harmônicas, ilustradas nas Figuras 32 e 33.

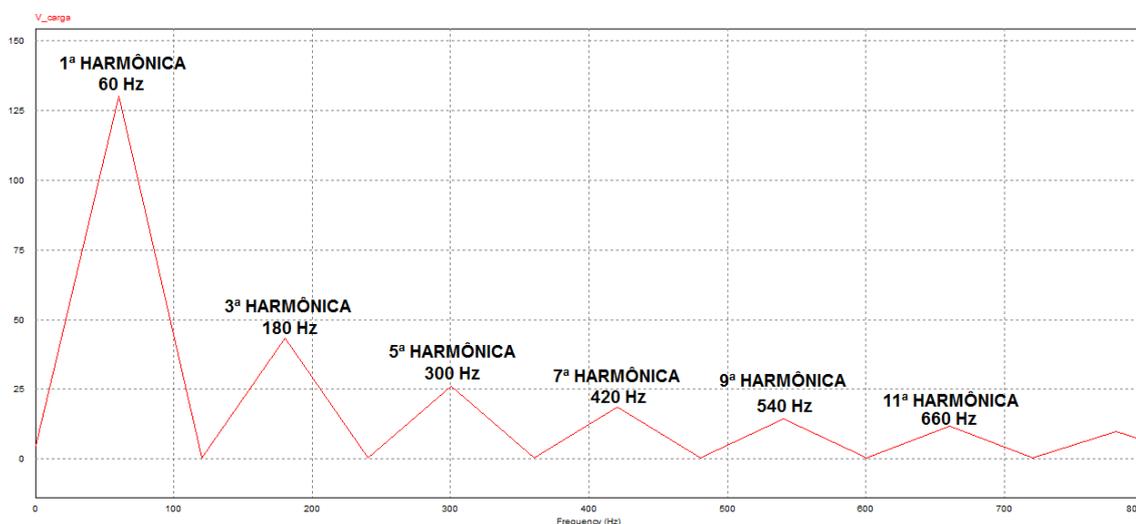
Figura 32 – Espectro harmônico, para *push-pull* com modulação UPWM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 32 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abscissas, os relativos a frequência em Hertz. Neste gráfico percebe-se a presença dos harmônicos de baixa ordem e também na frequência de chaveamento (20 kHz).

Figura 33 - Zoom do espectro harmônico, *push-pull* com modulação UPWM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como complemento a Figura 32 ilustrada anteriormente, foi alterado o eixo das ordenadas, para uma melhor resolução das componentes harmônicas de mais baixa ordem, conforme a Figura 33. Observa-se a frequência fundamental (60 Hz), seguida da 3ª harmônica (180 Hz), 5ª harmônica (300 Hz), 7ª harmônica (420 Hz), 9ª harmônica (540 Hz), com amplitudes de tensão significativas.

Com as informações gráficas obtidas, foi possível extrair dados e exibí-los conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Harmônicas da modulação com UPWM

Modulação	Amplitude da harmônica (V)								
	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	20 kHz	40 kHz	60 kHz
UPWM	128,8	43,0	25,8	18,5	14,4	11,8	49,0	11,8	0,80

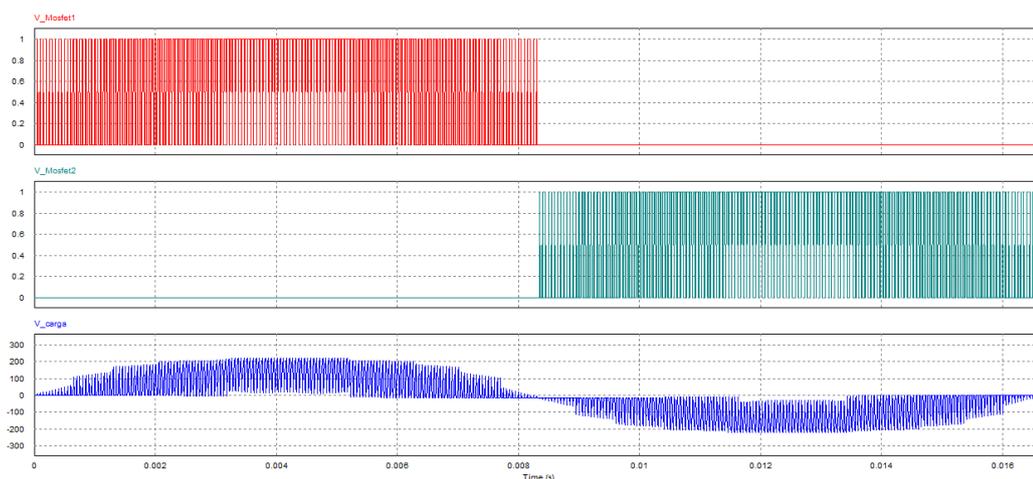
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Tabela 3, demonstra as significativas amplitudes dos componentes harmônicos de mais baixa ordem, característicos desta modulação. Percebe-se a presença de uma componente justamente na frequência de comutação das chaves, que é de 20 kHz.

4.1.3 Simulação da Topologia *Push-Pull* com Modulação SPWM

Nesta etapa foram executadas simulações com o auxílio do software PSIM na topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação SPWM, conforme a Figura 34.

Figura 34 - Sinais dos pulsos PWM e a forma de onda da tensão de saída



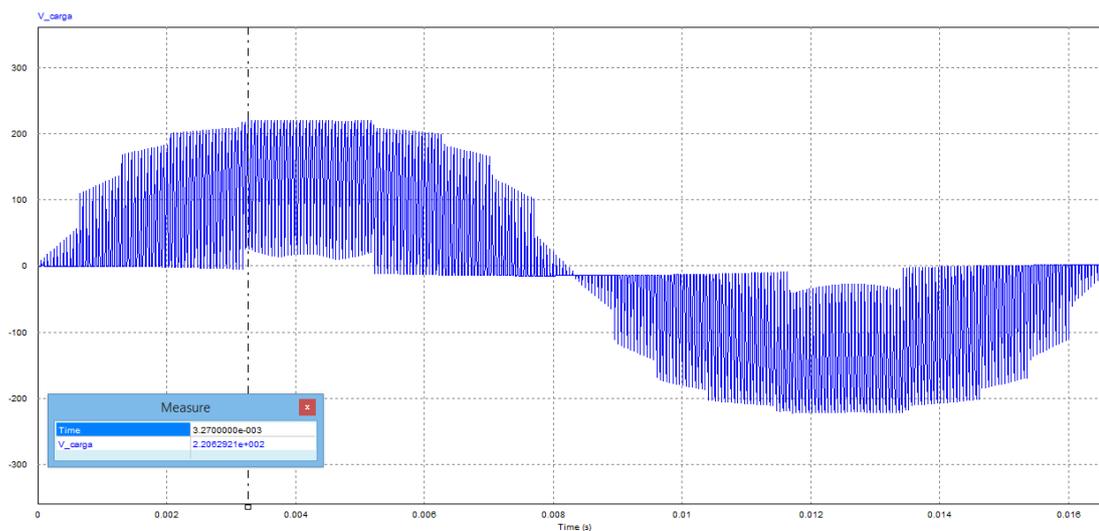
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 34, ilustra as formas de onda geradas na tela do simulador PSIM. Em vermelho (V_{mosfet1}) é representada a geração dos pulsos PWM que variam de 0 a 1, responsáveis pelo acionamento do primeiro transistor. Em verde (V_{mosfet2}) é representada a geração dos pulsos PWM que variam de 0 a 1, responsáveis pelo

acionamento do segundo transistor. E como consequência deste chaveamento que opera em alta frequência é gerado um sinal (V_{carga}), representado graficamente na cor azul, pelos componentes positivos, nulos (zeros) e negativos.

Para uma melhor visualização da forma de onda da tensão na carga, foi gerador o gráfico da Figura 35.

Figura 35 - Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms

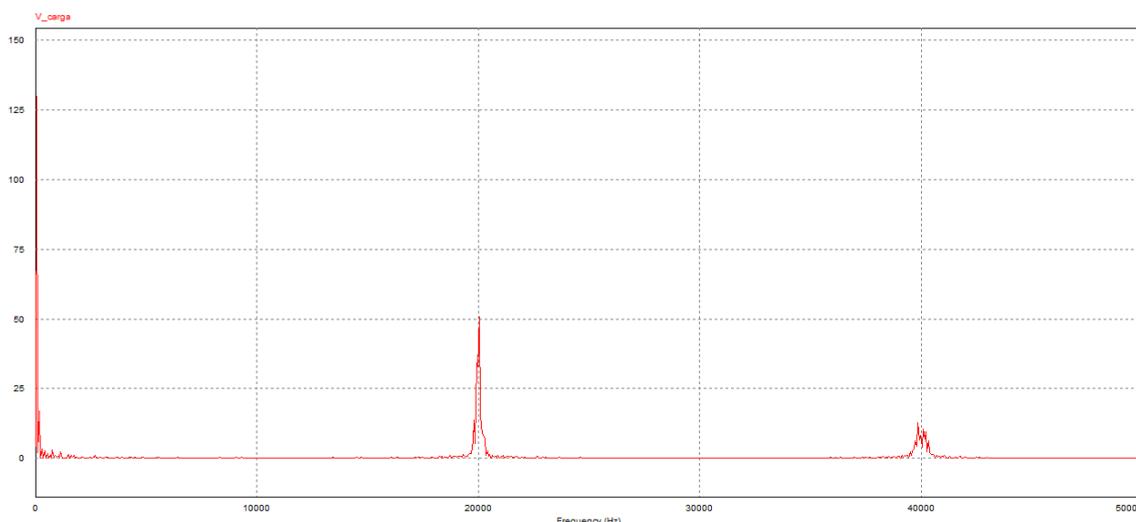


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 35 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abcissas, os relativos ao tempo em segundos. Para uma tensão da fonte de 12 Vcc, foi gerada uma tensão na saída de 220 Vca.

Com a função FFT (Transformada Rápida de Fourier) do software PSIM foi possível gerar o gráfico com as distorções harmônicas, ilustradas nas Figuras 36 e 37.

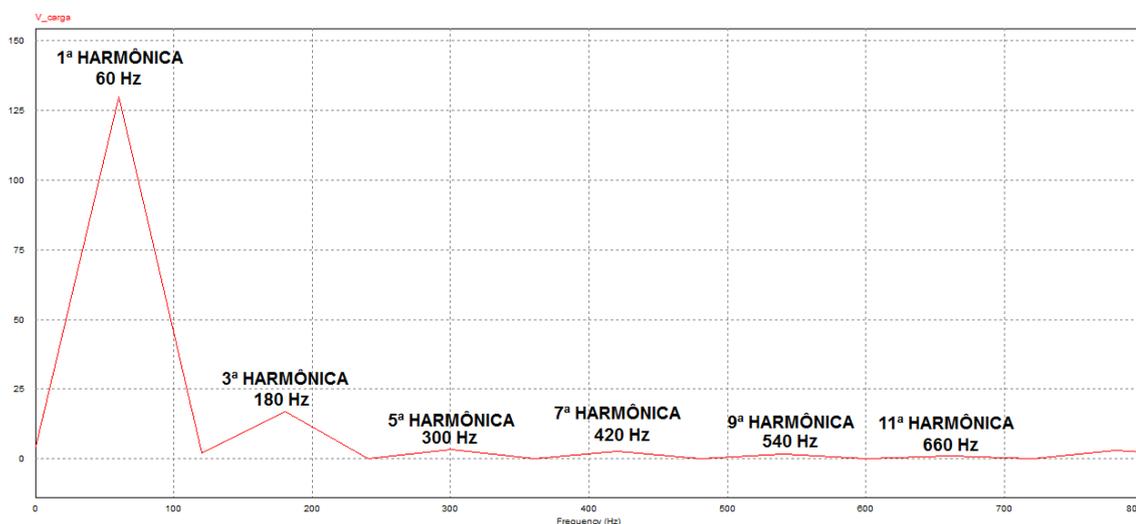
Figura 36 – Espectro harmônico, para *push-pull* com modulação SPWM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 36 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abscissas, os relativos a frequência Hertz. Neste gráfico percebe-se a pequena presença dos harmônicos de baixa ordem, resultando uma componente harmônica na frequência de chaveamento (20) kHz.

Figura 37 – Zoom do espectro harmônico, *push-pull* com modulação SPWM



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como complemento a Figura 36 ilustrada anteriormente, foi alterado o eixo das ordenadas, para uma melhor resolução das componentes harmônicas de mais baixa ordem, conforme a Figura 37. Observa-se a frequência fundamental (60 Hz), seguida da 3ª harmônica (180 Hz), 5ª harmônica (300 Hz), 7ª harmônica (420 Hz), 9ª

harmônica (540 Hz), com amplitudes de tensão bem reduzidas se comparado a outros métodos de modulação, como o PWM linear e o UPWM.

Com as informações gráficas da Figura 36 e 37, foi possível extrair dados e exibi-los conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Harmônicas da modulação com SPWM

Modulação	Amplitude da harmônica (V)								
	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	20 kHz	40 kHz	60 kHz
SPWM	128,6	16,9	3,35	2,71	1,75	1,18	49,5	4,11	0,50

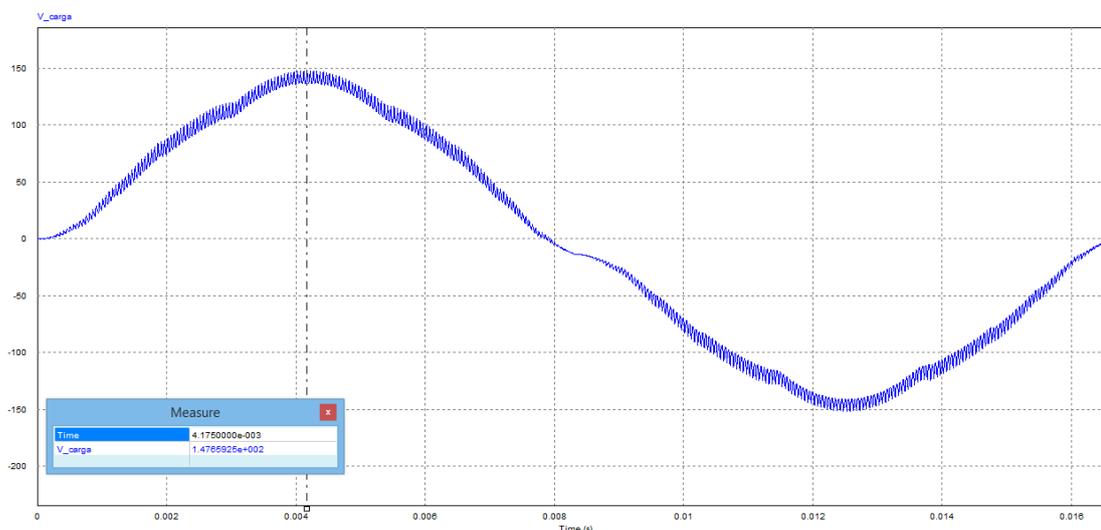
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Tabela 4 reforça que este método de modulação reduz significativamente as amplitudes dos harmônicos de baixa frequência, ocorreu uma pequena amplitude no terceiro harmônico. Entretanto o componente mais significativo ficou na frequência de comutação das chaves, que é de 20 kHz.

4.1.4 Simulação da Topologia *Push-Pull* com Modulação SPWM-LC

Nesta etapa foram executadas simulações com o auxílio do software PSIM na topologia do inversor de tensão CC/CA do tipo *push-pull* com modulação SPWM-LC, filtro passa baixa, conforme a Figura 38.

Figura 38 - Forma de onda da tensão de saída com o valor da tensão rms

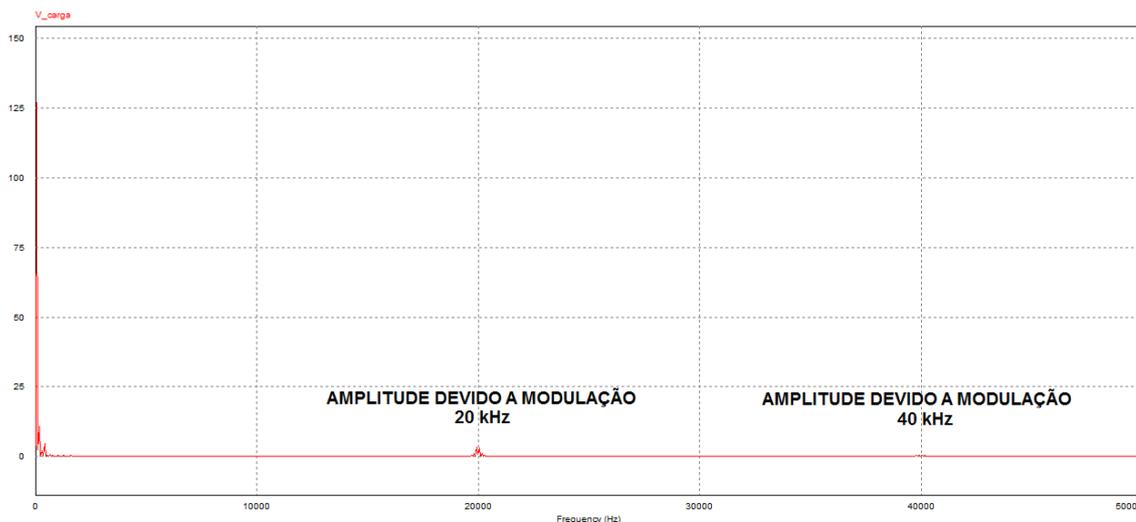


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 38 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abcissas, os relativos ao tempo em segundos. Devido a filtragem imposta pelo indutor e o capacitor, a forma de onda na saída fica com o formato próximo de uma senóide.

A Figura 39, representa o novo espectro harmônico da modulação SPWM com filtro LC.

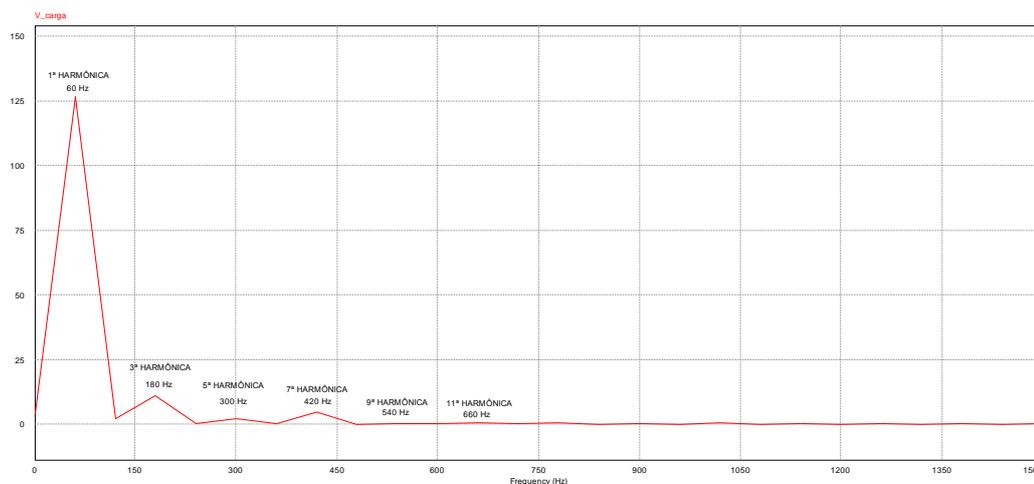
Figura 39 – Espectro harmônico, para push-pull com modulação SPWM-LC



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 39, demonstra o novo espectro harmônico, com a utilização do filtro LC passa baixa, considerando no eixo das ordenadas, em Volts e, no eixo das abcissas, os relativos a frequência Hertz.

Percebe-se a redução expressiva nas amplitudes dos harmônicos presentes nas altas frequências 20, 40 e 60 kHz.

Figura 40 – Zoom do espectro harmônico, *push-pull* com modulação SPWM-LC

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como complemento a Figura 39 ilustrada anteriormente, foi alterado o eixo das ordenadas, para uma melhor resolução das componentes harmônicas de mais baixa ordem, conforme a Figura 40. Teve-se uma redução dos harmônicos de 3ª (180 Hz) em diante, pela característica do filtro passa baixa, deixando passar frequências próximas da frequência nominal de 60 Hz.

Com as informações gráficas da Figura 39 e 40, foi possível extrair dados e exibi-los conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Harmônicas da modulação com SPWM-LC

Modulação	Amplitude da harmônica (V)								
	1ª	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	20 kHz	40 kHz	60 kHz
SPWM-LC	128,1	10,1	1,96	4,68	0,49	0,61	2,14	0,18	0,08

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Tabela 5, ilustra a redução significativa dos componentes harmônicos da 9ª ordem em diante, mas principalmente com maior impacto na amplitude da frequência de modulação, sendo esta de 20 kHz.

Nesta etapa foram realizadas as simulações utilizando os métodos PWM linear, UPWM, SPWM e por fim o SPWM-LC, demonstrando a diferença na geração dos pulsos PWM, que por sua vez, produzem na saída as formas de onda particulares de cada método. As simulações também ilustram as diferenças dos espectros harmônicos evidenciando os pontos fracos e fortes de cada método.

Na etapa a seguir serão efetuados os ensaios práticos conforme descrito no item 3.4 do capítulo 3.

4.2 Testes Práticos nos Inversores de Tensão - sem Carga

Nesta etapa foram realizados os ensaios práticos em bancada de testes do laboratório de eletrônica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), seguindo os protocolos de segurança do Ministério da Saúde ao Covid-19, referente a utilização de espaços fechados, sendo realizado prévio agendamento, para que no ambiente estivessem apenas o graduando e o laboratorista. Referente a energia elétrica, foi seguida a norma de segurança da NR-10 e as boas práticas no manuseio dos equipamentos e instrumentos de medição, para obtenção dos dados e registros para uma posterior análise técnica.

4.2.1 Consumo da Fonte CC com o Inversor Desligado

Neste teste foi medido o consumo de corrente elétrica que este equipamento drena da bateria automotiva de 12 Vcc, estando o inversor de tensão onda modificada desligado, Figura 41.

Figura 41 - Inversor de tensão onda modificada, consumo em stand-by



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O multímetro da esquerda conectado em série ao cabo de alimentação positivo, indica um consumo de corrente elétrica de 43,3 mA. O multímetro da direita conectado

em paralelo aos terminais da bateria, indica a tensão nominal de 12,41 Vcc, da fonte geradora.

Seguindo o mesmo padrão de teste foi medido o consumo de corrente elétrica da Figura 42 estando o inversor de tensão onda senoidal desligado.

Figura 42 - Inversor de tensão senoidal, consumo em stand-by



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Foi medido um consumo de 39,11 mA, com a tensão nominal de 12,41 Vcc, da fonte geradora. Os valores medidos, demonstram um pequeno consumo de corrente elétrica, possivelmente ocasionado pela etapa de entrada CC. Estes dados são característicos do conceito de projeto do circuito de eletrônica, variando de um equipamento para outro. Em um cenário ideal e conservador, do ponto de vista de autonomia da bateria, busca-se um consumo em modo desligado próximo de zero.

4.2.2 Formas de Onda, Tensão, Espectro da Amplitude e de Fase

Para execução deste teste, Figura 43, e dos demais na sequência indicada neste estudo, o interruptor (*on/off*) do inversor está na posição (*on*), inversor no estado ligado.

Figura 43 – Inversor de tensão onda modificada no teste sem carga

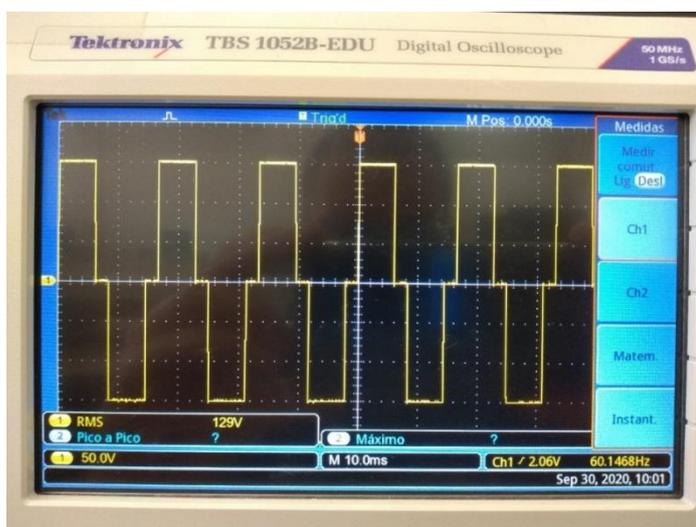


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na Figura 43, a tensão da bateria automotiva está em 12,62 Vcc e o inversor de tensão de onda modificada está fornecendo em seus terminais de saída o valor de 127,5 Vca, ambas medições estão indicadas na tela dos multímetros.

A Figura 44, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 44 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio



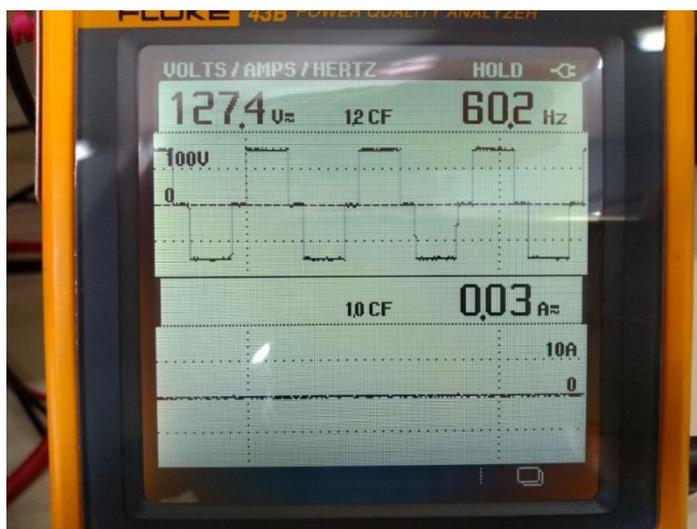
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A forma de onda quadrada modificada, Figura 44, obtida dos terminais de saída do inversor, é característica da configuração deste equipamento (modulação PWM-linear) e também informada pelo fabricante. Foi percebido algumas deformações no

padrão de onda, provocadas pelas componentes harmônicas de tensão. A tensão indicada pelo osciloscópio foi de 129 Vca com uma frequência de 60,14 Hz. Esta forma de onda denominada quadrada modificada, apresenta os componentes positivos, zeros e negativos, na tentativa de se aproximar de uma forma senoidal.

A Figura 45, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 45 - Forma de onda da tensão com o analisador

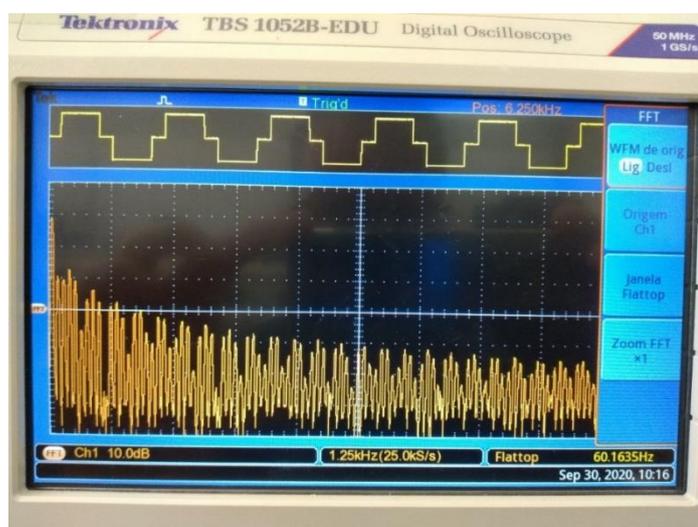


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Neste teste da Figura 45, não ocorre leitura de corrente, uma vez que, não há carga conectada aos terminais de saída. Nota-se que a forma de onda se mantém a mesma, demonstrada na leitura anterior realizada pelo osciloscópio, com novos valores de tensão 127,4 Vca e frequência 60,2 Hz.

A Figura 46, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo as componentes harmônicas da tensão de saída.

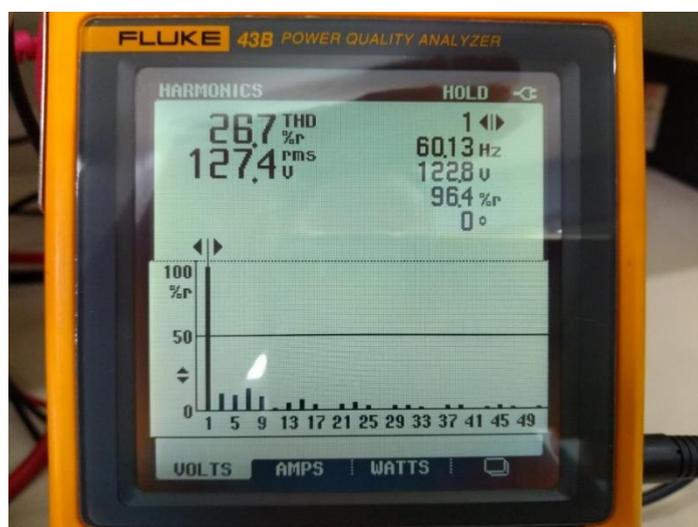
Figura 46 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Foi registrado com a função FFT, Figura 46, a grande quantidade de componentes harmônicos, conforme esperado neste tipo de equipamento. Para uma melhor análise, a Figura 47 demonstra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo as componentes harmônicas e a THD da tensão.

Figura 47 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão

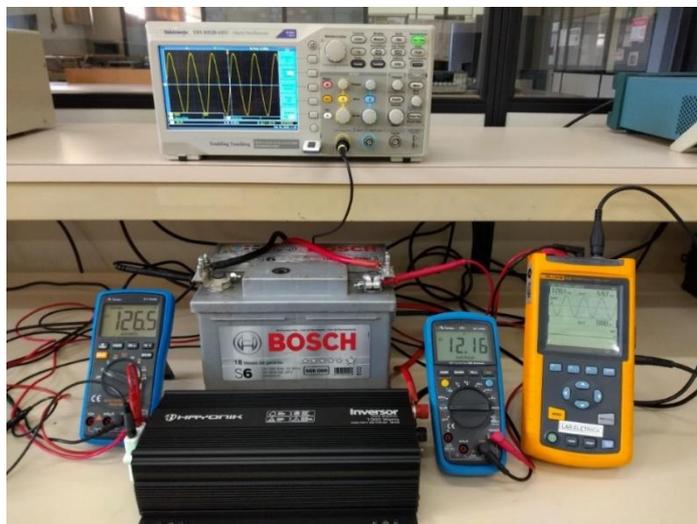


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 47 ilustra uma quantidade significativa de componentes harmônicos em especial de 3ª à 9ª ordem, mas também foi registrado pequenas contribuições da 13ª a 33ª ordem. A distorção harmônica de tensão total (THDv) da tensão ficou em 26,7 %.

Foi seguido o padrão de teste na situação sem carga, entretanto, utilizando o inversor de tensão senoidal, conforme a Figura 48.

Figura 48 - Inversor de tensão onda senoidal no teste sem carga

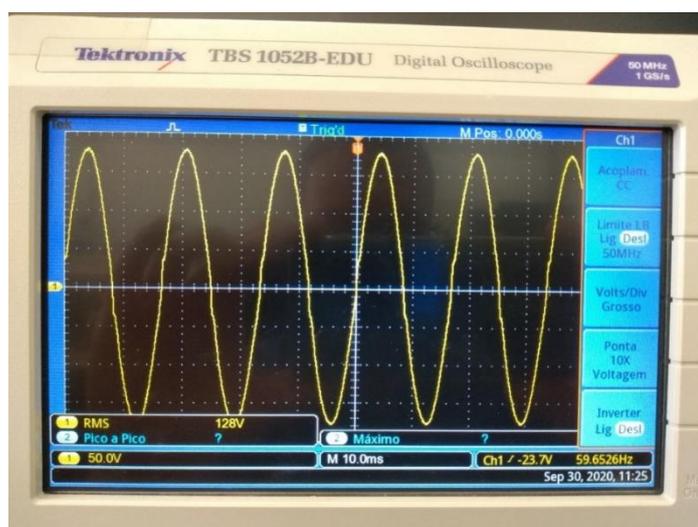


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na figura 48, a tensão da bateria automotiva está em 12,16 Vcc e o inversor de tensão de onda senoidal está fornecendo em seus terminais de saída o valor de 126,5 Vca, ambas medições estão indicadas na tela dos multímetros.

A Figura 49, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 49 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio

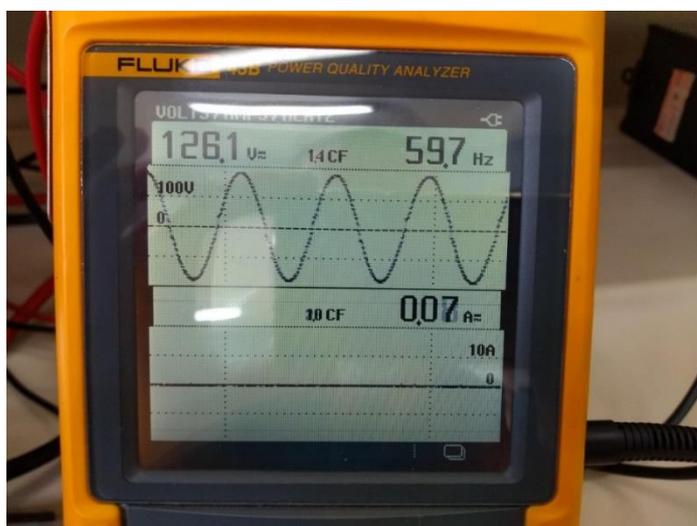


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A forma de onda senoidal, Figura 49, obtida dos terminais de saída do inversor, é característico da configuração deste equipamento (modulação SPWM-LC), como informado pelo fabricante. Entretanto foi percebido uma leve deformação no padrão de onda, provocada pela harmônica de tensão de 3ª ordem. A tensão indicada pelo osciloscópio foi de 128 Vca com uma frequência de 59,65 Hz. Esta forma de onda de maneira geral possui o mesmo padrão da rede elétrica convencional, se considerarmos a forma, tensão e frequência, respeitando as particularidades de cada região, como tensão (127/220) Vca e frequência (50/60) Hz.

A Figura 50, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 50 - Forma de onda da tensão com o analisador

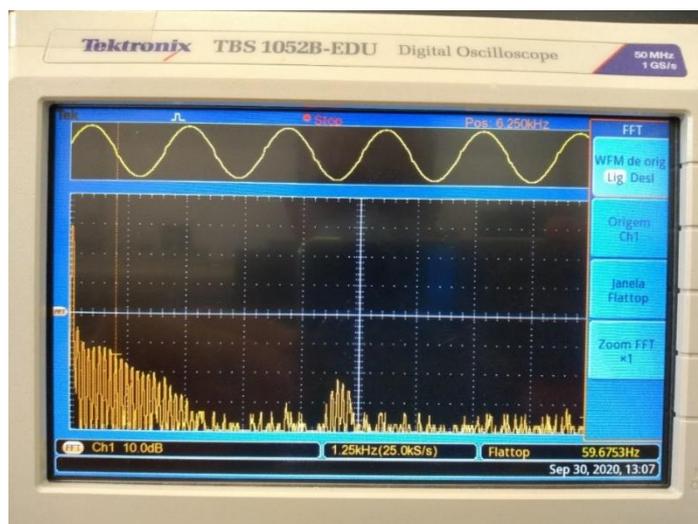


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 50, ilustra a leitura do analisador Fluke da forma de onda da tensão na saída. Neste teste não ocorre leitura de corrente, uma vez que, não há carga conectada aos terminais de saída. Nota-se que a forma de onda se mantém a mesma, demonstrada na leitura anterior realizada pelo osciloscópio, com novos valores de tensão 126,1 Vca e frequência 59,7 Hz.

A Figura 51, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo as componentes harmônicas da tensão de saída.

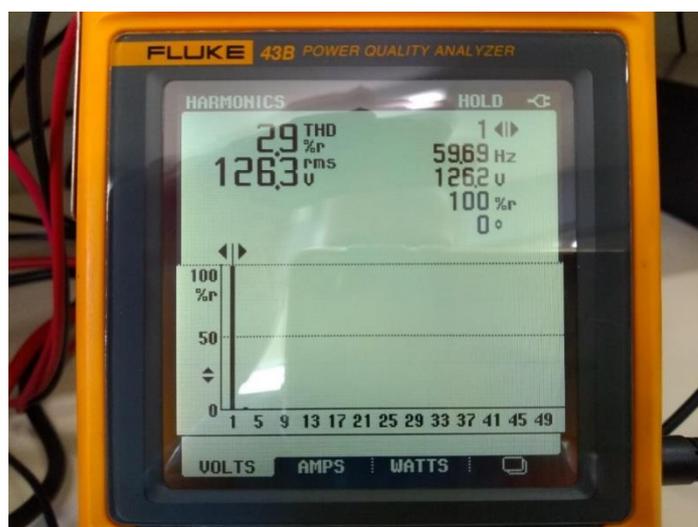
Figura 51 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como ilustra a Figura 51, neste tipo de equipamento ocorre uma redução significativa nos componentes harmônicos, que são deslocados para as altas frequências, geralmente em torno da frequência de chaveamento. Para uma melhor análise, a Figura 52 demonstra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo as componentes harmônicas e a THD da tensão.

Figura 52 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

É característico deste equipamento conforme a Figura 52, ocorrer uma redução significativa de componentes harmônicos, se torna presente a componente fundamental de 1ª ordem e a de 3ª ordem. A THD da tensão ficou em 2,9 %.

4.3 Testes Práticos nos Inversores de Tensão – com Carga

Nesta etapa os dois tipos de inversores foram submetidos a alimentação de cargas lineares e não lineares com o objetivo de registrar o comportamento de suas características elétricas, para posterior análise dos dados.

4.3.1 Testes com Carga Linear e Não Linear

Nesta etapa do teste, foi aplicado uma carga linear (com resistência de $1,3\text{ k}\Omega$ e potência de $12,5\text{ W}$) na saída do inversor de onda modificada, conforme a Figura 53.

Figura 53 - Inversor de tensão onda modificada no teste com carga linear

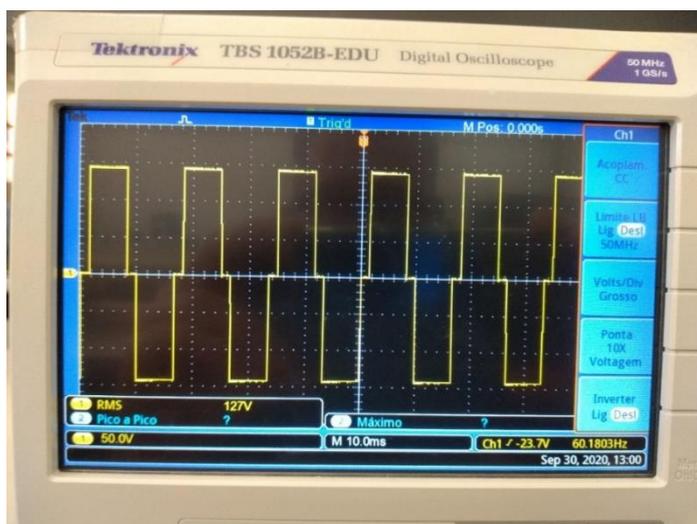


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na Figura 53, a tensão da bateria automotiva está em $12,24\text{ Vcc}$ e o inversor de tensão de onda modificada está fornecendo em seus terminais de saída o valor de $126,2\text{ Vca}$, ambas medições estão indicadas na tela dos multímetros.

A Figura 54, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

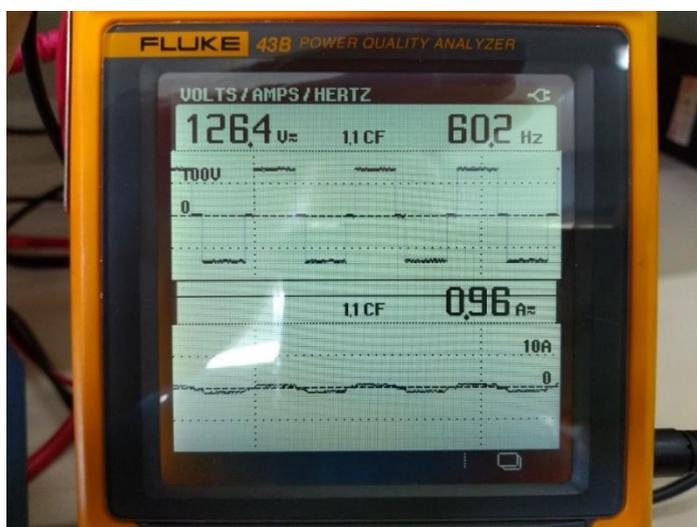
Figura 54 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 54 ilustra, a forma de onda quadrada modificada, obtida dos terminais de saída do inversor. A tensão indicada pelo osciloscópio foi de 127 Vca com uma frequência de 60,18 Hz.

Figura 55 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio

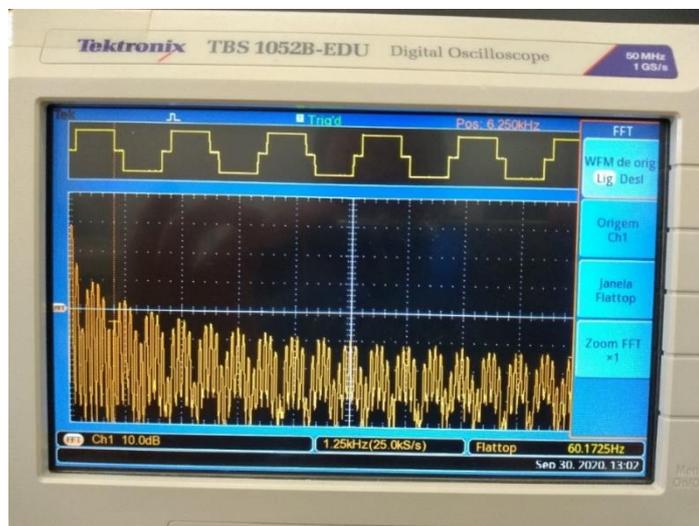


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na leitura do analisador Fluke, Figura 55, torna-se mais fácil a visualização de uma pequena deformidade na forma de onda da tensão, que apresentou os valores de 126,4 Vca e frequência 60,2 Hz. A forma de onda da corrente ficou de acordo com uma carga resistiva de 12 W, com o valor de 96 mA (corrigindo a escala de leitura do alicate amperímetro).

A Figura 56, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo as componentes harmônicas da tensão de saída do inversor.

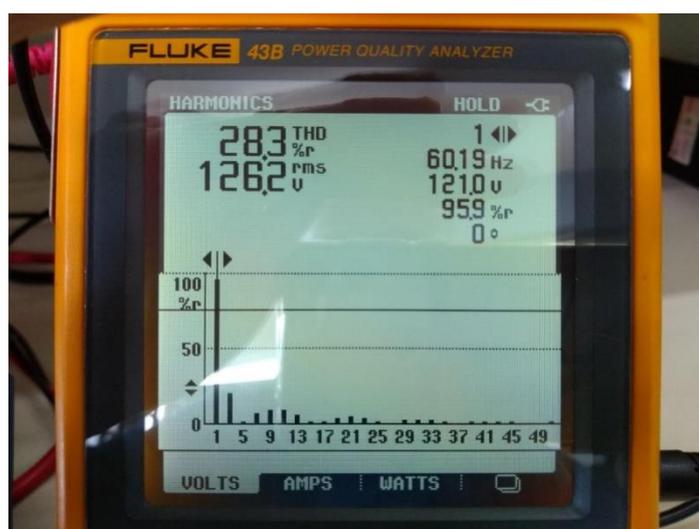
Figura 56 – Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 56, ilustra a grande quantidade de componentes harmônicas, similar a condição do teste anterior sem carga. Entretanto, para uma melhor análise, a Figura 57 demonstra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo as componentes harmônicas e a THD da tensão.

Figura 57 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão

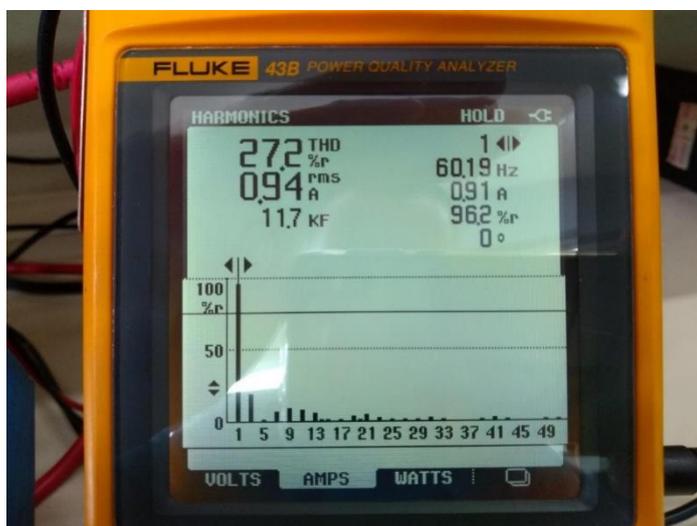


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 57, ilustra um aumento significativo do harmônico de 3ª a 9ª ordem e também, o de 15ª ordem. A THD da tensão ficou em 28,3 %.

Na Figura 58, foram obtidas as componentes harmônicas e a THD da corrente.

Figura 58 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente elétrica

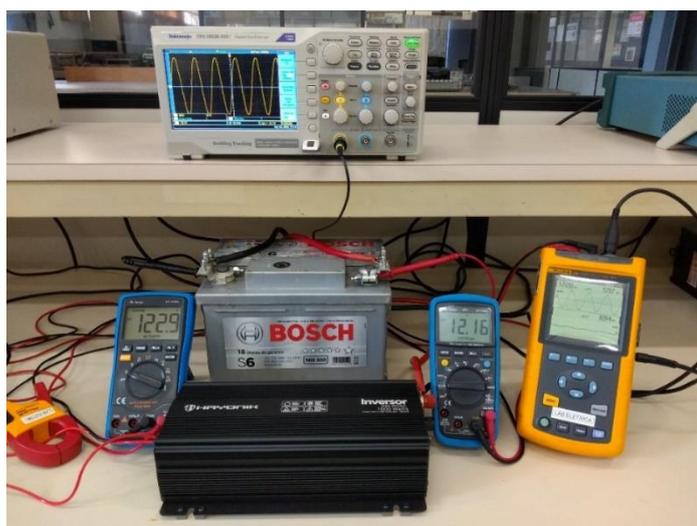


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Como já esperado, o espectro dos componentes harmônicos da corrente, não demonstraram uma significativa alteração, pelo fato da carga ser resistiva, considerada linear. A THD da corrente ficou em 27,2 %.

Mantendo os critérios aplicados, no procedimento anterior, nesta etapa foi utilizado o inversor de tensão senoidal, conforme a Figura 59.

Figura 59 - Inversor de tensão onda senoidal no teste com carga linear

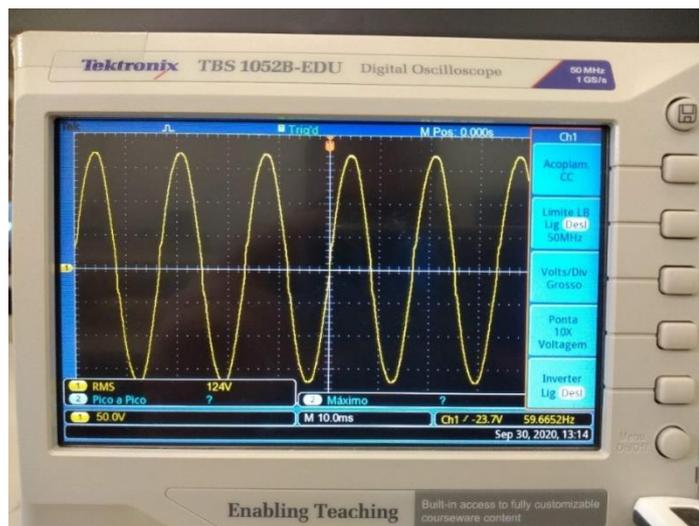


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na Figura 59, a tensão da bateria automotiva está em 12,16 Vcc e o inversor de tensão de onda senoidal está fornecendo em seus terminais de saída o valor de 122,9 Vca, ambas medições estão indicadas na tela dos multímetros.

A Figura 60, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 60 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio

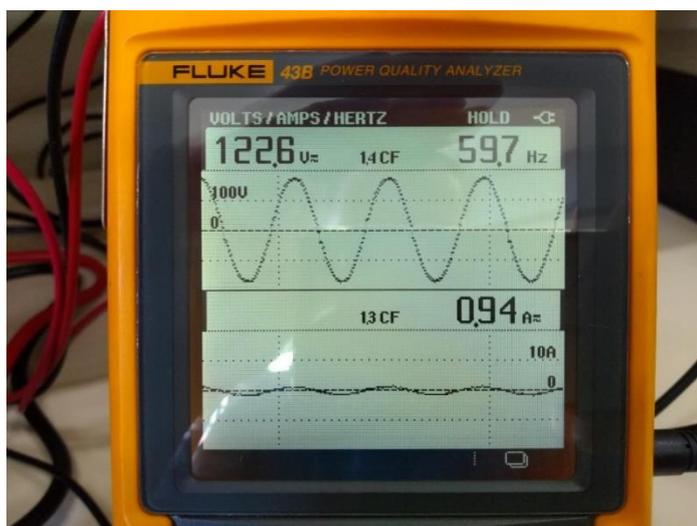


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na condição de alimentar uma carga linear, Figura 60, o inversor senoidal, forneceu uma tensão de 124 Vca com uma frequência de 59,66 Hz, não apresentando um impacto na sua forma de onda.

A Figura 61, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo a forma de onda da tensão e corrente de saída.

Figura 61 - Forma de onda da tensão com o analisador

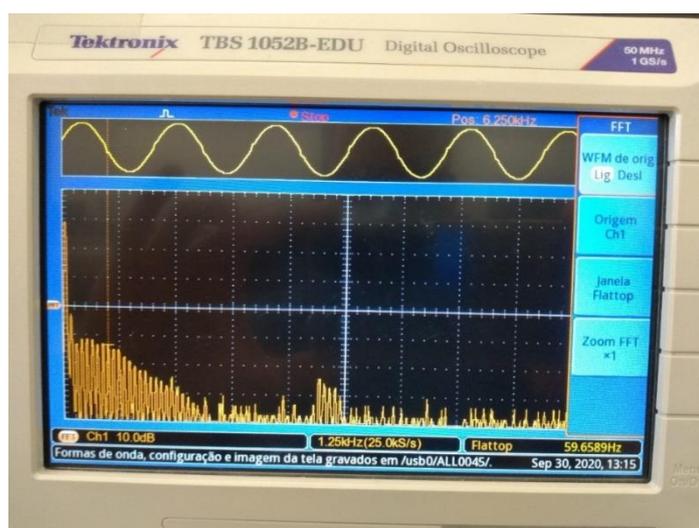


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na leitura do analisador Fluke, Figura 61, torna-se mais fácil a visualização de uma pequena deformidade na forma de onda da tensão, que apresentou os valores de 122,6 Vca e frequência 59,7 Hz. A forma de onda da corrente ficou de acordo com uma carga resistiva de 12 W, com o valor de 94 mA (corrigindo a escala de leitura do alicate amperímetro).

A Figura 62, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo as componentes harmônicas da tensão de saída.

Figura 62 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio

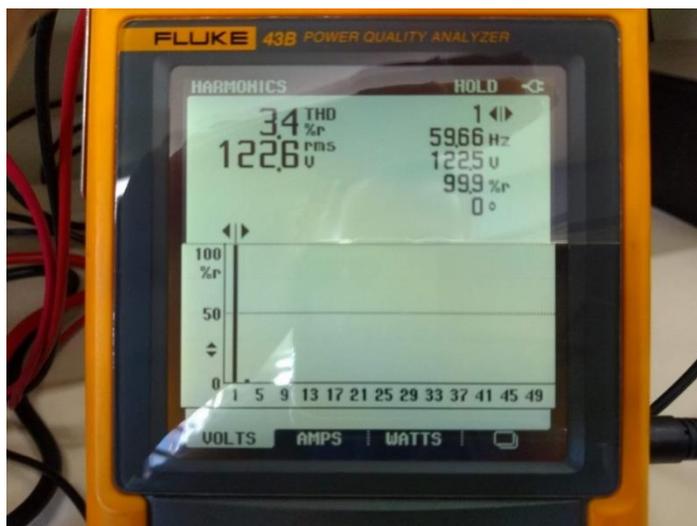


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 62, ilustra a maior amplitude na componente fundamental, seguida das 3ª a 5ª ordem, mas com menores amplitudes. Um pequeno pico é registrado, em alta frequência, não impactando na carga.

Para uma melhor análise, a Figura 63 demonstra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo as componentes harmônicas e a THD da tensão.

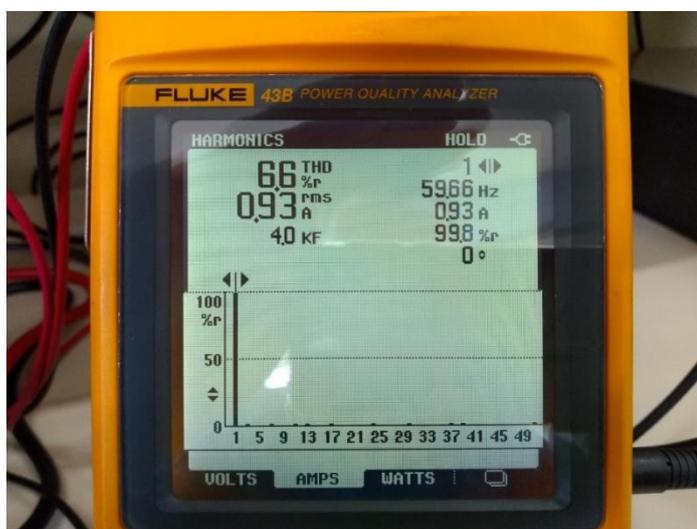
Figura 63 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Nesta medição, Figura 63, verificou-se a presença do harmônico de 3ª ordem. A THD da tensão ficou em 3,4 %. Na Figura 64, foram obtidas as componentes harmônicas e a THD da corrente.

Figura 64 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente

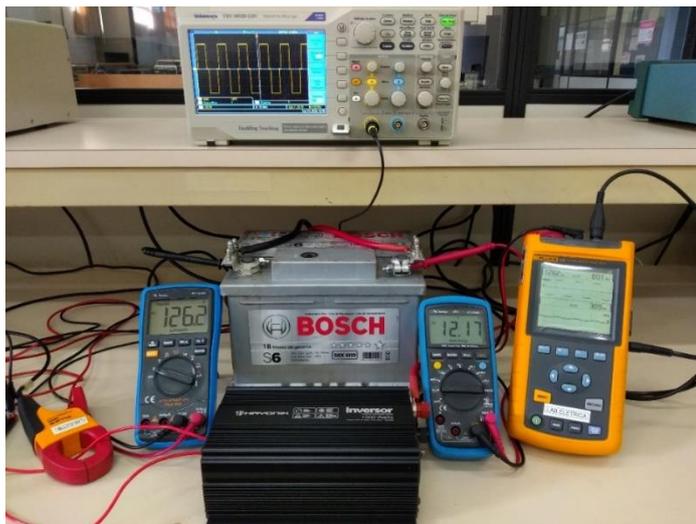


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 64, demonstra o surgimento de componentes harmônicos de corrente, porém com uma pequena amplitude. A THD da corrente ficou em 6,6 %.

Mantendo os critérios anteriores, foi aplicado neste teste uma carga não linear (notebook com fonte de alimentação) na saída do inversor onda modificada, conforme a Figura 65.

Figura 65 - Inversor de tensão onda modificada no teste com carga não linear

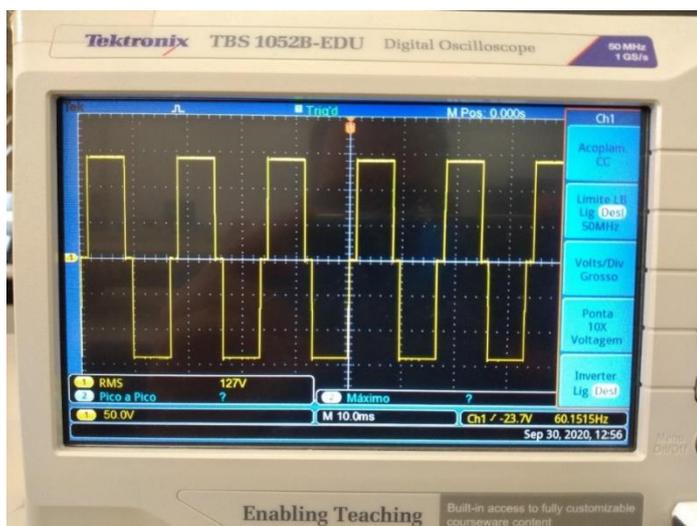


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na Figura 65, a tensão da bateria automotiva está em 12,17 Vcc e o inversor de tensão de onda modificada está fornecendo em seus terminais de saída o valor de 126,2 Vca, ambas medições estão indicadas na tela dos multímetros.

A Figura 66, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 66 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio

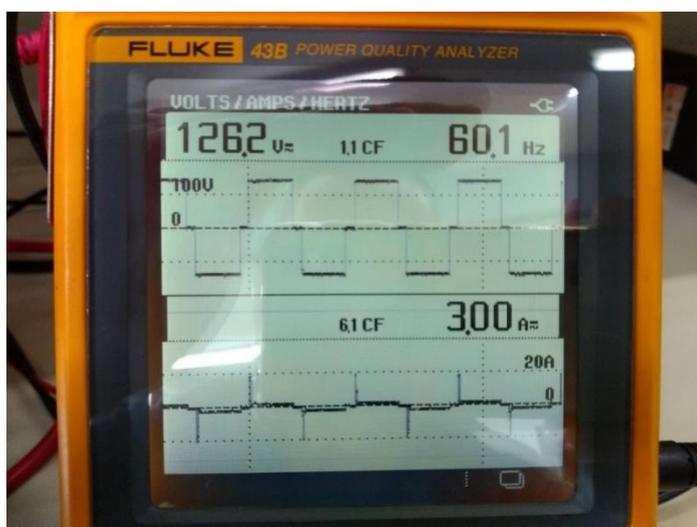


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 66 ilustra, a forma de onda quadrada modificada, obtida dos terminais de saída do inversor. A tensão indicada pelo osciloscópio foi de 127 Vca com uma frequência de 60,15 Hz.

A Figura 67, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo a forma de onda da tensão e corrente de saída.

Figura 67 - Forma de onda da tensão com o analisador



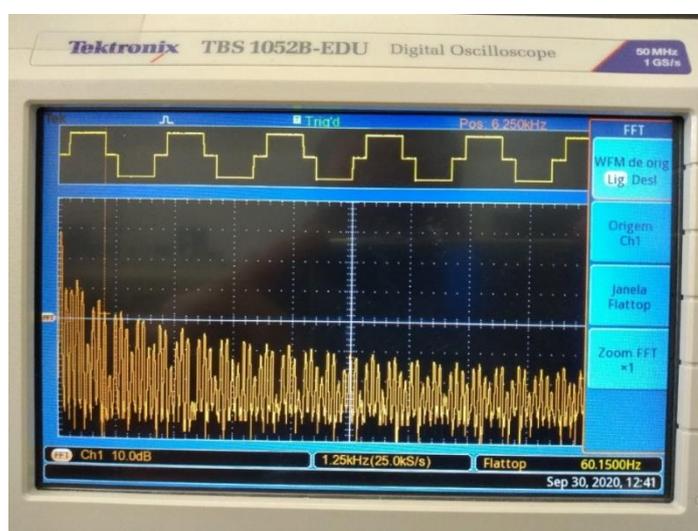
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na leitura do analisador Fluke, Figura 67, a deformidade na forma de onda da tensão se manteve a mesma, apresentou os valores de 126,2 Vca e frequência 60,1 Hz. A forma de onda da corrente, representa o funcionamento da fonte chaveada do

computador, que apresenta um elevado valor de pico da corrente, no instante de carregamento do capacitor. Em regime, quando a alimentação de tensão é nula, o capacitor começa a se descarregar, momento que não há tensão sobre a carga. Nesse instante ocorre uma variação brusca de tensão sobre o capacitor elevando a sua corrente de carga e conseqüentemente, a corrente de entrada do circuito. (GALHARDO e PINHO, 2004). A corrente nominal obtida foi de 3,0 A.

A Figura 68, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo as componentes harmônicas da tensão de saída.

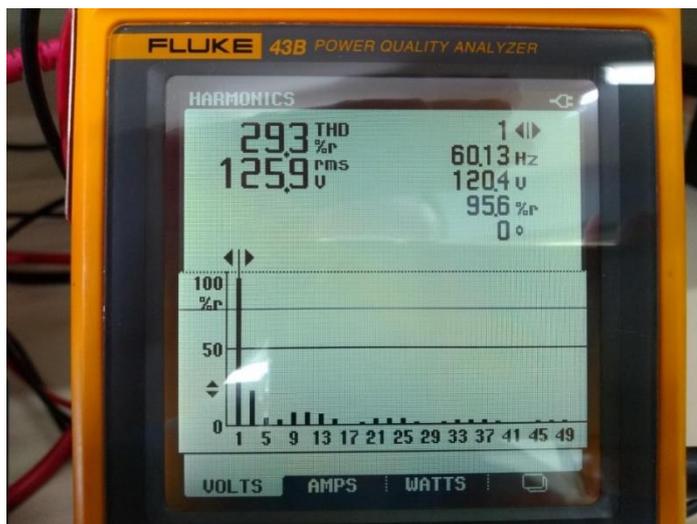
Figura 68 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Pela tela do osciloscópio, Figura 68, não foi percebido uma diferença dos componentes harmônicos pela alteração no tipo de carga. Entretanto a Figura 69, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo as componentes harmônicas e a THD da tensão, com uma facilidade na leitura dos dados, gráficos e numéricos.

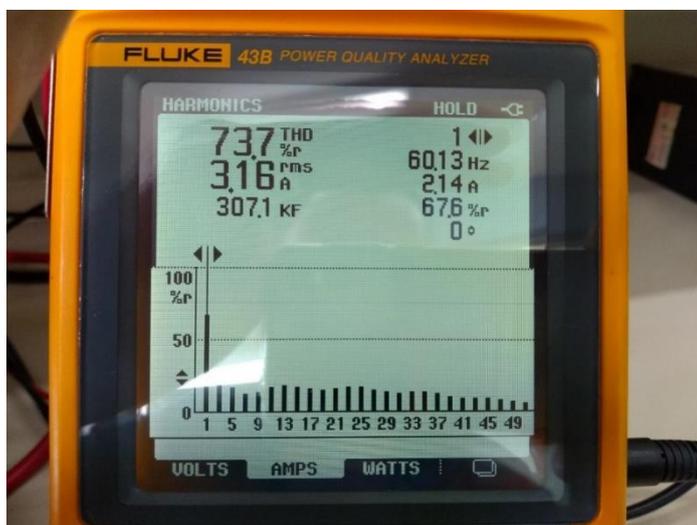
Figura 69 - Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 69, ilustra uma pequena contribuição do harmônico de 5ª e 7ª ordem. Porém amplitudes significativas podem ser vistas nas componentes da 9ª a 13ª ordem. A THD da tensão ficou em 29,3 %. Na Figura 70, foram obtidas as componentes harmônicas e a THD da corrente.

Figura 70 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente

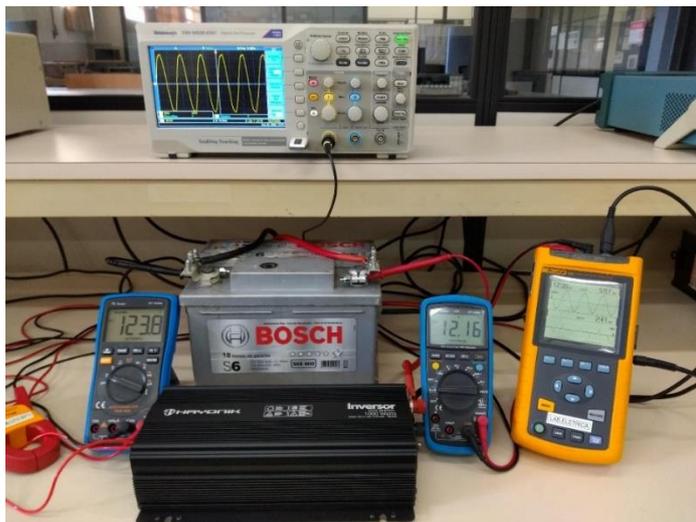


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Todos os componentes harmônicos da corrente, sofreram um incremento de amplitude, pela influência da carga não linear. A THD da corrente ficou em 73,7 %.

Na última etapa dos testes com carga não linear (notebook com fonte de alimentação), passou-se a adotar o inversor senoidal, conforme a Figura 71.

Figura 71 - Inversor de tensão onda senoidal no teste com carga não linear

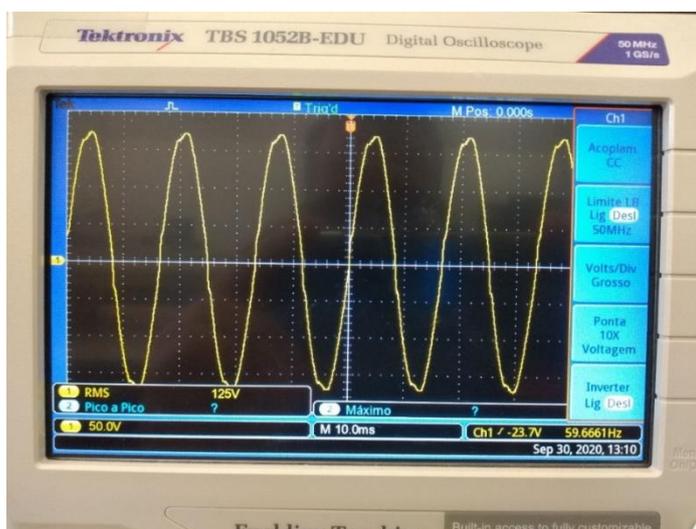


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na figura 71, a tensão da bateria automotiva está em 12,16 Vcc e o inversor de tensão de onda senoidal está fornecendo em seus terminais de saída o valor de 123,8 Vca, ambas medições estão indicadas na tela dos multímetros.

A Figura 72, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo a forma de onda da tensão de saída.

Figura 72 - Forma de onda da tensão com o osciloscópio



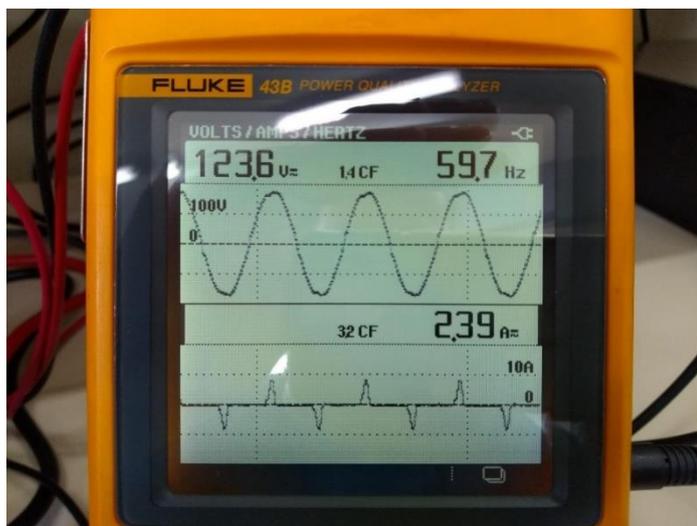
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A Figura 72 ilustra, de forma clara, o impacto na forma de onda senoidal, proveniente da interferência da carga não linear. Neste momento já não se tem uma

forma de onda senoidal perfeita. A tensão indicada pelo osciloscópio foi de 125 Vca com uma frequência de 59,66 Hz.

A Figura 73, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo a forma de onda da tensão e corrente de saída.

Figura 73 - Forma de onda da tensão com o analisador

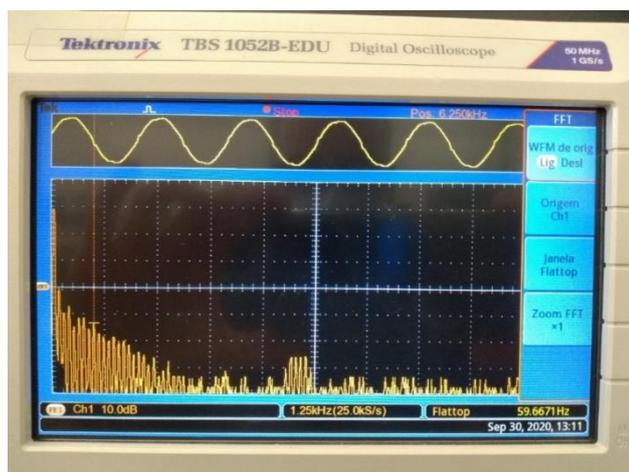


Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Pela forma construtiva das fontes chaveadas, a forma de onda da corrente, Figura 73, obtida de 2,39 A, não se comporta como uma senoide, pois apresenta impulsos no momento que o capacitor é carregado, o qual ocorre a cada meio ciclo, pois não existe uma indutância alta na saída do inversor. O capacitor da fonte carrega-se com a tensão de pico do inversor. Quando a tensão de entrada da fonte torna-se menor do que a tensão no capacitor, os diodos ficam bloqueados e a corrente é fornecida pelo capacitor ao qual vai se descarregando, até que a tensão de entrada na fonte fique maior e o capacitor se recarregue, (GALHARDO e PINHO, 2004).

A Figura 74, ilustra a tela de medição do osciloscópio Tektronix, fornecendo as componentes harmônicas da tensão de saída.

Figura 74 - Leitura dos harmônicos de tensão pela FFT do osciloscópio



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Pela tela do osciloscópio, Figura 74, não foi percebido uma grande diferença dos componentes harmônicos pela alteração no tipo de carga. Entretanto a Figura 75, ilustra a tela de medição do analisador Fluke, fornecendo as componentes harmônicas e a THD da tensão, com uma facilidade na leitura dos dados, gráficos e numéricos.

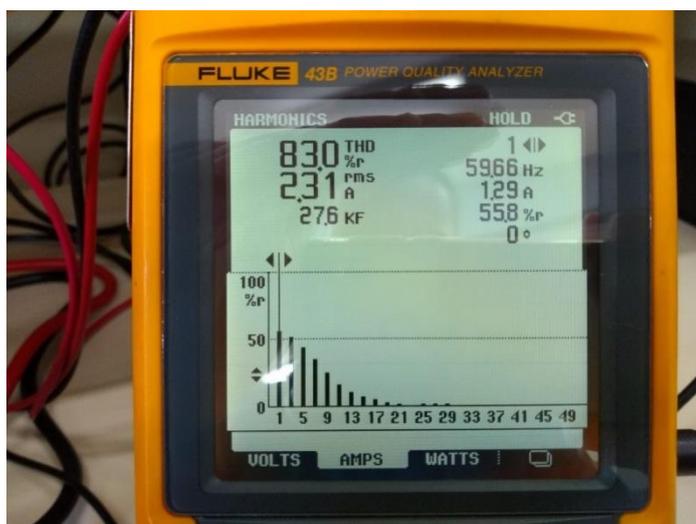
Figura 75 – Espectro harmônico de amplitude e fase da tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Nesta medição, Figura 75, ocorreu apenas o surgimento do harmônico de 3ª ordem. A THD da tensão ficou em 4,0 %. Na Figura 76, foram obtidas as componentes harmônicas e a THD da corrente.

Figura 76 - Espectro harmônico de amplitude e fase da corrente



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A carga não linear, teve um impacto significativo na geração das componentes harmônicas de corrente, em especial de 3ª a 15ª ordem. Percebe-se pela medição do instrumento, que este tipo de carga provoca distorções na fonte geradora, (RASHID, 2014). A THD da corrente ficou em 83,0 %.

4.3.2 Teste com Carga Nominal de 1000 W

Na execução deste teste, apenas a bateria de 60 Ah não suportou a demanda, sendo necessário utilizar como reforço o alternador de um veículo automotivo, para manter o nível de tensão da bateria em 13,8 Vcc.

A Figura 77, demonstra o teste de carga nominal para o inversor de tensão de onda modificada.

Figura 77 – Tensão, corrente e frequência nos terminais de carga



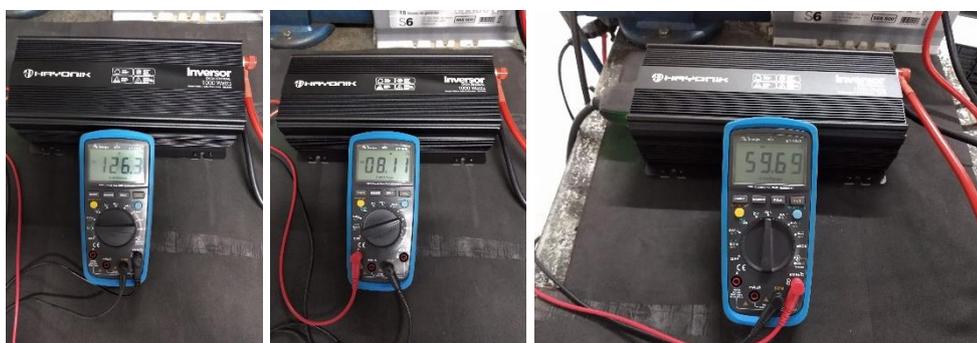
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A potência total do ensaio prático, foi de 1022 W. É ilustrada na Figura 77, os valores obtidos nos terminais de carga, para a tensão foi de 126,1 Vca, para a corrente 8,11 A e para a frequência 60,15 Hz.

Na execução dos testes, o equipamento não apresentou sobreaquecimento, tão pouco a ativação dos alarmes internos, mesmo considerando uma temperatura ambiente de 29°C.

A Figura 78, demonstra o teste de carga nominal de 1000 W, para o inversor de tensão senoidal, considerando os mesmos critérios anteriores.

Figura 78 - Tensão, corrente e frequência nos terminais de carga



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A potência total do ensaio prático, foi de 1024 W. É ilustrada na Figura 78, os valores obtidos nos terminais de carga, para a tensão foi de 126,3 Vca, para a corrente 8,11 A e para a frequência 59,69 Hz.

Durante o período de testes, não foi observado sobreaquecimento, apenas a ventoinha interna entrou em operação, situação normal de funcionamento, mesmo considerando uma temperatura ambiente de 29°C.

4.4 Análise das Simulações com os Resultados Práticos dos Ensaio

Neste tópico, foi realizada uma análise técnica dos dados numéricos e gráficos gerados nas simulações, bem como das informações obtidas nos testes práticos com ambos inversores de tensão.

Desta forma, o estudo partiu da aquisição de dois inversores de tensão monofásicos com entrada de 12 Vcc e saída de 127 Vca, com frequência de 60 Hz. Um dos equipamentos possui a forma de onda do tipo quadrada modificada com modulação por (PWM - Linear pulso único) e o outro a forma de onda do tipo senoidal

com modulação por (SPWM-LC filtro passa baixa). O estudo focou na topologia adotada por estes equipamentos, vindo a ser do tipo *push-pull*, segundo Libert (2015) e Ahmed (2000), muito utilizado pela indústria.

Com a utilização do software PSIM, foi possível modelar as topologias e realizar as simulações. Isto possibilitou obter os pulsos de acionamento dos transistores nas modulações (sinal PWM), obtendo desta maneira as formas de onda na saída e seus respectivos valores de tensão. Na Tabela 6, foi gerado um comparativo entre as modulações, com o auxílio da função FFT do software PSIM.

Tabela 6 - Harmônicas das modulações, PWM, UPWM, SPWM e SPWM-LC

Modulações	Amplitude da harmônica (V)								
	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	20 kHz	40 kHz	60 kHz
PWM	128,5	97,8	49,5	32,8	24,4	27,5	0,32	0,11	0,03
UPWM	128,8	43,0	25,8	18,5	14,4	11,8	49,0	11,8	0,80
SPWM	128,6	16,9	3,35	2,71	1,75	1,18	49,5	4,11	0,50
SPWM-LC	128,1	10,1	1,96	4,68	0,49	0,61	2,14	0,18	0,08

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A modulação por PWM linear (pulso simples ou pulso único) tem por característica apresentar elevados componentes harmônicos em baixas frequências. Em contrapartida o método UPWM (pulsos múltiplos), tem uma redução deste efeito nas baixas frequências, pois desloca os harmônicos para as altas frequências, perto da frequência de modulação em kHz. Já o método SPWM tem uma redução bem significativa dos harmônicos de baixa ordem, pois desloca os mesmos para as altas frequências. Por fim o incremento do filtro LC passa baixa na modulação SPWM, reduz consideravelmente as amplitudes dos harmônicos acima da frequência nominal de 60 Hz.

Os dados simulados, vem de encontro com a literatura já existente, que aponta estas características evidenciadas.

Com o intuito de realizar um estudo prático em bancada de testes, os inversores de onda quadrada modificada e de onda senoidal foram submetidos a ensaios técnicos, partindo dos dados informados nas etiquetas de identificação. Algumas informações disponibilizadas pelo fabricante são mais significativas neste momento da análise, como as mencionadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de tolerância dos inversores de tensão adquiridos

	Tensão	Frequência
	127 Vca	60 Hz
Tolerância (+/-)	10 %	3 Hz
Variação	(114,3 a 139,7) Vca	(57 a 63) Hz

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na etapa dos ensaios práticos, foi mantido um nível de tensão de (12,16 a 12,62) Vcc, na bateria automotiva, utilizada como fonte geradora, afim de não influenciar em uma alteração na tensão de saída Vca, ocasionando com isto uma leitura e análise incorreta. A Tabela 8 demonstra todos os valores coletados:

- consumo desligado (stand-by);
- sem carga (a vazio);
- com carga linear (resistência de aquecimento), e;
- com carga não linear (fonte chaveada e notebook).

Tabela 8 - Dados obtidos nos testes práticos

		INVERSOR DE TENSÃO MONOFÁSICO	
		ONDA MODIFICADA	ONDA SENOIDAL
CONSUMO STAND-BY (mA)		43,3	39,1
SEM CARGA	TENSÃO DE ENTRADA (Vcc)	12,62	12,16
	TENSÃO DE SAÍDA (Vca)	127,5	126,5
	FREQUÊNCIA (Hz)	60,2	59,7
	THDV (%)	26,7	2,9
CARGA LINEAR	TENSÃO DE ENTRADA (Vcc)	12,24	12,16
	TENSÃO DE SAÍDA (Vca)	126,4	122,9
	FREQUÊNCIA (Hz)	60,2	59,7
	THDV (%)	28,3	3,4
	THDI (%)	27,2	6,6
CARGA NÃO LINEAR	TENSÃO DE ENTRADA (Vcc)	12,17	12,16
	TENSÃO DE SAÍDA (Vca)	126,2	123,8
	FREQUÊNCIA (Hz)	60,1	59,7
	THDV (%)	29,3	4
	THDI (%)	73,7	83

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

No teste de consumo de corrente elétrica em modo desligado, o inversor de onda modificada apresentou um valor de 43,3 mA, enquanto o inversor de onda senoidal apresentou um valor de 39,1. Ambos resultados são considerados baixos se

comparados com outros equipamentos do mercado que apresentam um consumo de 500 mA.

Os níveis de tensão e frequência, fornecidos nos terminais de saída dos equipamentos, se comparados aos dados do fabricante, ficaram dentro dos limites de tolerância, para a tensão (114,3 a 139,7) Vca e para a frequência (57 a 63) Hz. Uma característica relevante é a de que não houve variação da frequência em virtude de uma carga estar ou não conectada a saída.

Entretanto, os níveis de distorção harmônica total de tensão (THD_V), do inversor de tensão de onda modificada, ficaram entre (26 a 29) %, todavia, estes percentuais atendem somente a norma brasileira, ABNT-NBR 14561 (2000). Porém para o inversor de tensão de onda senoidal, os valores de (THD_V) ficaram entre (2,9 a 4) % atendendo os critérios da norma brasileira, ABNT-NBR 14561 (2000) e das normas internacionais, KKK-A-1822E (GSA AUTOMOTIVE, 2002) e IEEE 446 (IEEE, 1995).

As normas referidas neste estudo não referenciam os níveis de distorção harmônica total de corrente (THD_I), porém nos ensaios técnicos foi evidenciado a vantagem do inversor de onda senoidal. Contudo, os dados também demonstram que este equipamento sofreu mais interferência quando estava alimentando uma carga de natureza não linear.

Já no teste de carga nominal, Tabela 9, foi verificado o comportamento dos equipamentos frente a uma demanda de 100 % de fornecimento, isto é, na potência de 1000 W. Os ensaios práticos evidenciaram, que nesta situação a fonte geradora é muita exigida, sendo necessário que o alternador do veículo esteja em funcionamento, a fim de suprir esta alta demanda de corrente, evitando assim um afundamento na tensão de entrada.

Tabela 9 - Dados obtidos nos testes práticos

		INVERSORES DE TENSÃO MONOFÁSICOS		
		ONDA MODIFICADA	ONDA SENOIDAL	
TESTES VEÍCULO	CARGA DE 1000 W	TENSÃO DE ENTRADA (Vcc)	13,8	13,8
		TENSÃO DE SAÍDA (Vca)	126,1	126,3
		FREQUÊNCIA (Hz)	60,1	59,6

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Contudo, os valores obtidos pelos instrumentos de medição, não registraram afundamentos de tensão e frequência nos terminais de carga, apenas pequenas

oscilações foram percebidas devido aos degraus de carga acrescidos, até ser atingido o patamar de 100 %.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho tratou do estudo da qualidade de energia elétrica dos inversores de tensão de uso automotivo no emprego específico em ambulâncias de suporte avançado (SA), por meio da análise técnica das características elétricas destes equipamentos, verificando o aspecto da forma de onda da tensão, da corrente e da presença de distúrbios harmônicos.

A partir da aquisição dos dois tipos de inversores de tensão, se realizou um estudo da topologia adotada por estes equipamentos e adotou-se uma metodologia baseada na modelagem e simulação da topologia *push-pull*, com modulação PWM linear (pulso único ou pulso simples), UPWM (pulsos múltiplos), SPWM e SPWM-LC (filtro passa baixa), e com posteriores ensaios técnicos em bancada.

A metodologia aplicada trouxe resultados de encontro com os estudos já existentes destes equipamentos, provando que a técnica é válida para a análise da qualidade de energia elétrica fornecida por estes inversores de tensão. Já o software PSIM, utilizado na modelagem e simulação das topologias, foi de extrema importância para a validação dos dados obtidos, comprovando que o inversor de tensão de onda modificada utiliza a técnica de modulação por PWM linear (pulso único ou pulso simples), para a geração da forma de onda do tipo quadrada modificada. Entretanto o inversor de tensão senoidal utiliza a técnica de modulação por SPWM-LC (filtro passa baixa), para a geração da forma de onda do tipo senoidal. Reforçando que ambos equipamentos utilizam a modulação em três níveis (+V, zero e -V).

Para a validação dos equipamentos, foram adotadas as normas ABNT-NBR 14561 (2000), KKK-A-1822E (GSA AUTOMOTIVE, 2002) e IEEE 446 (IEEE, 1995) em conjunto com as informações técnicas disponibilizadas pelo fabricante.

Os resultados se mostraram válidos do ponto de vista técnico, apontando que o inversor de tensão de onda modificada possui uma alta taxa de componentes harmônicos, principalmente em baixas frequências, com elevadas taxas de distorção harmônica de tensão. Desta forma, este equipamento atendeu somente a norma brasileira ABNT-NBR 14561 (2000). Em contrapartida, o inversor de tensão de onda senoidal, apresentou baixas taxas de distorção harmônica de tensão, com pequenos índices de componentes harmônicos, característicos de sua concepção de produto. Desta forma o equipamento atendeu todas as normas referenciadas neste estudo.

Ambos equipamentos apresentaram um pequeno consumo no estado desligado (stand-by), mas mesmo sendo muito inferior, se comparado a outros inversores do mercado, sugere-se a utilização de uma chave denominada chave geral, a fim de evitar o descarregamento da bateria auxiliar, por períodos de inatividade do veículo.

No aspecto de capacidade de fornecimento, os dois tipos de inversores de tensão atenderam a potência comercialmente informada, sendo esta de 1000 W. Quando submetidos a esta demanda, mantiveram os níveis de tensão e frequência dentro dos patamares aceitáveis.

Foi possível concluir com este estudo, que o inversor de tensão de onda modificada atende ao seu propósito, que é o de fornecer energia elétrica, porém apresentando uma baixa qualidade. Por outro lado, o inversor de tensão senoidal se destaca no cumprimento dos requisitos quanto à forma de onda da tensão do tipo senoidal, aos baixos níveis de THDv e aos baixos níveis de componentes harmônicos. Neste contexto, o inversor senoidal apresenta uma maior qualidade de energia e é o mais indicado para aplicações em ambulâncias de suporte avançado (SA), tendo em vista que nestes veículos as cargas possuem papel primordial para o salvamento e a manutenção de vidas.

Como sugestão para a continuidade deste trabalho, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- analisar o comportamento dos inversores de tensão, com a utilização de uma bateria do tipo estacionária;
- realizar os mesmos testes propostos neste trabalho com os inversores alimentando equipamentos presentes em veículos de suporte avançado;
- modelar e simular toda a estrutura real dos inversores de tensão;
- replicar este estudo para outros fabricantes de inversores de tensão, e;
- verificar aspectos de rendimento energético, para diferentes níveis de cargas elétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 1 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- ANDERSEN, R. **Processamento da Energia em Sistemas de Célula a Combustível**. UFPB – Universidade Federal da Paraíba, p. 46. 2013.
- ARRABAÇA, D.; GIMENEZ, S.. **Eletrônica de Potência: conversores de energia ca/cc, Teoria, Prática e Simulações**. 2. ed. Porto Alegre: Érica, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14561: Veículos para atendimento a emergências médicas e resgate - Especificações**. São Paulo. 2000.
- BOLOTINHA, M. Fundamentos de Sistemas Trifásicos. **ABRACOPEL**. março de 2020. Disponível em: <<https://abracopel.org/download/fundamentos-de-sistemas-trifasicos/>>. Acesso em: 16 maio 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2048, de 5 de novembro de 2002**. Regulamento para o atendimento de urgências médicas e de resgate. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2002. Disponível em:<https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2002/prt2048_05_11_2002.html>. Acesso em 17 maio 2020.
- CAMPANHOL, L. B. G.; MALVEZZI, V. B.; SILVA, A. O. **Cálculo de Grandezas de Potência Elétrica em Sistemas Monofásicos Utilizando Instrumentação Virtual**. UNOPAR – Universidade do Norte do Paraná, p. 117. 2013.
- CANESIN, C. A. **Eletrônica De Potência 2 – Teoria básica de Inversores CC-CA**. UNESP – Universidade Estadual Paulista, p. 117. 2016.
- CARVALHO, A. C. **Diagnóstico do Consumo e da Qualidade de Energia numa Indústria Metalúrgica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira. 2004.
- CHITODE, J. S.: **Industrial Electronics**. 4. ed. Índia: Technical Publication Pune, 2009.
- FANEM, **Manual da Incubadora Neonatal**. São Paulo, p. 42. 2009.
- FIGUEIREDO, A. C., **Análise de Modelos para Cargas Não Lineares no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2006.
- GALHARDO, M.; PINHO, J. **Avaliação da Qualidade da Energia Fornecida por Sistemas Renováveis Isolados de Pequeno Porte**. UFPA – Universidade Federal da Paraíba, p. 10. 2011.
- GALHARDO, M.; PINHO, J. **Influência da Forma de Onda de Alimentação Sobre Cargas Não Lineares Em Sistemas de Geração de Pequeno Porte**. UFPA – Universidade Federal da Paraíba, p. 8. 2005.

GENERAL SERVICE ADMINISTRATION. **KKK-A-1822E - Federal Specification for the “Star-of-Life Ambulance”**, Federal Supply Service (GSA AUTOMOTIVE). Texas, p. 104. 2002.

GERENT, F. H. **Metodologia De Projeto De Inversores Monofásicos De Tensão Para Cargas Não-Lineares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2005.

HART, D.: **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. 2. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2001.

HAYONIK. **Manual Técnico do Inversor de Tensão de Onda Modificada**. [S.l.], p. 11. 2020.

HAYONIK. **Manual Técnico do Inversor de Tensão de Onda Senoidal**. [S.l.], p. 11. 2020.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 446 Recommended Practice for Electronics for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications**. IEEE Standards Boards. New York, p.54. 1995.

INSTRAMED. **Manual do Cardioversor/Desfibrilador**. Porto Alegre, p. 203. 2019.

INSTRAMED. **Manual do Monitor Multiparâmetro**. Porto Alegre, p. 126. 2019.

LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; FERNANDO ANTUNES. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LIBERT, N. **Eletrônica De Potência – Inversores CC/CA**. UTFPR – Universidade tecnológica Federal do Paraná, p. 37. 2015.

MAGNAMED. **Manual do Ventilador Pulmonar para Transporte**. São Paulo, p. 134. 2019. Rev. 22.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 3 ed. São Paulo: Érica, 2013

MEHL, Ewaldo. **Fontes Chaveadas**. UFPR - Faculdade de Engenharia Elétrica. Paraná, p. 11. 2009.

MENDES, S.; PASCHOARELI, D.; FARIA, M. **Impacto da Utilização de Inversores em Sistemas de Geração Distribuída Sobre Equipamentos Rurais**. UNESP – Universidade Estadual Paulista, p. 10. 2002.

PAULILLO, G.; RIBEIRO, P. Aspectos da Qualidade da Energia Elétrica no Contexto de Redes Inteligentes. **O Setor Elétrico**, n. 93, p. 44-45, janeiro 2013. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/11/ed-93_Fasciculo_Cap-X-Qualidade-de-energia.pdf>. Acesso em: 10 maio 2020.

PAULILLO, G.; RIBEIRO, P. Harmônicos - Conceitos. **O Setor Elétrico**, n. 85, p. 34-38, janeiro 2013. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/wp->

content/uploads/2013/03/Ed85_fasciculo_qualidade_cap2.pdf>. Acesso em: 12 maio 2020.

PAULILLO, G. Conceitos Gerais Sobre Qualidade da Energia. **O Setor Elétrico**, n. 84, p. 28-35, janeiro 2013. Disponível em: <http://www.oseforeletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf>. Acesso em: 14 maio 2020.

PIRES, I. A. **Caracterização de Harmônicos Causados por Equipamentos Eletroeletrônicos Residenciais e Comerciais no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais. 2006.

POMILIO, J. A. **Eletrônica De Potência**. UNICAMP - Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação (FEEC). Campinas, p. 15. 2007.

POWERSIM INC. **PSIM User's Guide**. [S.I.], p. 280. 2018 (V11.1.3).

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, Circuitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Makon Books, 1999.

RASHID, M. H.: **Eletrônica de Potência: Dispositivos, Circuitos e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Makon Books, 2014.

REGO S.; ALAN K. **Eletrônica de Potência e Acionamentos elétricos**. Instituto Federal de Minas Gerais. Ouro Preto, p. 130. 2015.

SAMTRONIC. **Manual da Bomba de Infusão**. São Paulo, p. 68. 2009. Rev. 4.

SANTOS, W. B. **Estudo, Reprodução e Análise de um Inversor de Tensão em Ponte Completa Chaveado em Alta Frequência com Saída Senoidal Pura**. Trabalho de conclusão de curso (Pós Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná. 2017.

SILVA, F. M.; CAMELO N. J.; SAAVEDRA O. R.; SANTOS W. M.: **Iluminação Baseada em Sistemas Fotovoltaicos: Análise de Desempenho sob Condição de Tensão Não-Senoidal**. UFMA – Universidade Federal do Maranhão, p. 9. 2003.

SOUZA, J. R. A.; MORENO, H. NBR5410. **Revista Eletricidade Moderna**, n. 84, p. 239-247, São Paulo 2001. Disponível em: <https://www.academia.edu/6129265/Guia_EM_da_NBR_5410_Copyright_-_Revista_Eletricidade_Moderna>. Acesso em: 06 maio 2020.

TIGGEMANN, H. **Análise e Desenvolvimento de um Inversor Monofásico de Baixa Potência Aplicado a Sistemas de Transporte**. Trabalho de conclusão de curso (Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade do Vale do Taquari. Rio grande do Sul. 2008.

TURCATTO, C. A. **Inversor de Tensão 127 V/1 kVA**. Trabalho de conclusão de curso (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2010.