

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

WILIAN ITIRO TATIBANA

**ANÁLISE DAS HARMÔNICAS GERADAS PELO INVERSOR FOTOVOLTAICO
OPERANDO COM BAIXA POTÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO DE FILTRO PASSIVO
SIMULADO**

MEDIANEIRA

2021

WILIAN ITIRO TATIBANA

**ANÁLISE DAS HARMÔNICAS GERADAS PELO INVERSOR FOTOVOLTAICO
OPERANDO COM BAIXA POTÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO DE FILTRO PASSIVO
SIMULADO**

**Analysis of harmonics generated by the photovoltaic inverter operating with
low power and implementation of simulated passive filter**

Trabalho de conclusão de graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Me. Edson Andreoli

MEDIANEIRA

2021



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

WILIAN ITIRO TATIBANA

**ANÁLISE DAS HARMÔNICAS GERADAS PELO INVERSOR FOTOVOLTAICO
OPERANDO COM BAIXA POTÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO DE FILTRO PASSIVO
SIMULADO**

Trabalho de Conclusão de Graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02/novembro/2021

Edson Andreoli

Mestrado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira

Evandro André Konopatzki

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira

Filipe Marangoni

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira

MEDIANEIRA

2021

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Edson Andreoli, e a minha banca avaliadora Prof. Dr. Evandro André Konopatzki, Prof. Me. Ismael Burgardt e Prof. Dr. Filipe Marangoni pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

Aos meus colegas de turma.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

A minha namorada que esteve sempre comigo durante esta etapa da minha vida.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

"As nuvens mudam sempre de posição,
mas são sempre nuvens no céu. Assim
devemos ser todo dia, mutantes, porém
leais com o que pensamos e sonhamos;
lembre-se, tudo se desmancha no ar,
menos os pensamentos."

(BALEKI, Paulo, 2005).

RESUMO

Com a crescente demanda de energia elétrica, e por preocupações relacionadas ao meio ambiente, a geração distribuída renovável vem ganhando ênfase em meio as fontes geradoras convencionais. O principal tipo de geração descentralizada é a fotovoltaica, ela está sendo amplamente utilizada no Brasil devido sua facilidade de instalação e constantes reduções dos custos de implementação. Com isso, surgem questionamentos relacionados aos impactos da distorção harmônica na qualidade de energia. Tendo em vista que, há a necessidade do inversor para a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), durante esse processo ocorre a geração de harmônicos na rede elétrica. O presente trabalho tem como objetivo analisar as normas vigentes relacionadas a distorções harmônicas, gerar a forma de onda de saída do inversor, com o levantamento de dados de dois tipos de inversores, com variadas potências nominais, de modo a avaliar as harmônicas de maior influência na saída do inversor. Os resultados apresentam o dimensionamento e a implementação de um filtro sintonizado, bem como após a implementação do filtro verificou-se uma redução de 8,4% para 0,019% no inversor de 3 kW operando com 20% da potência nominal, e 10,6% para 2,469% no inversor de 20 kW operando também com 20% da potência nominal nas harmônicas presentes sinal de saída do inversor, para dentro dos limites admissíveis por norma, principalmente nos períodos onde o inversor opera abaixo de sua potência nominal.

Palavras chaves: geração distribuída de energia elétrica; qualidade de energia; sistemas fotovoltaicos; filtro de harmônicos.

ABSTRACT

With the growing demand for electricity, and concerns related to the environment, distributed renewable generation has been gaining emphasis among conventional generating sources. One of the main types of generation is photovoltaic, they are being widely used in Brazil due to their ease of installation and constant reduction in implementation costs. Thus, questions arise related to the impacts of harmonic distortion on power quality. Considering that, there is a need for the inverter to convert direct current (DC) to alternating current (AC), where during this process harmonics are generated in the electrical network. The present work aims to analyze the current standards related to harmonic distortions, generate the inverter output waveform, with data collection from two types of inverters, with varied nominal powers, in order to evaluate the most influential harmonics at the inverter output. The results show the sizing and implementation of a tuned filter, as well as after the filter implementation there was a reduction from 8,4% to 0,019% in the 3 kW inverter operating at 20% of the nominal power, and 10,6 % to 2,469% in the 20 kW inverter operating also with 20% of the nominal power in the harmonics present at the inverter output signal, within the permissible limits by standard, mainly in periods where the inverter operates below its nominal power.

Keywords: distributed generation of electric power; power quality; photovoltaic systems; harmonic filter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Forma de onda a partir de carga linear	18
Figura 2 - Forma de onda a partir da carga não linear	19
Figura 3 - Sistema elétrico com geração distribuída	23
Figura 4 - Valores médios por largura de pulso.....	25
Figura 5 - Modulação do sinal senoidal PWM em 2 níveis	25
Figura 6 - Espectros de tensão moduladora com a portadora triangular	26
Figura 7 - Topologia inversor 2 níveis trifásico VSI	27
Figura 8 - Relação entre os harmônicos de corrente em relação à corrente fundamental	30
Figura 9 - Filtro simples e filtro de dupla sintonia	33
Figura 10 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 20 % da potência nominal do inversor de 3 kW.....	35
Figura 11 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 75 % da potência nominal do inversor de 3 kW	36
Figura 12 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 20 % da potência nominal do inversor de 20 kW.....	37
Figura 13 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 75 % da potência nominal do inversor de 20 kW.....	38
Figura 14 - Fonte de corrente.....	39
Figura 15 - Bloco PS Harmonic Estimator	39
Figura 16 - Scope.....	40
Figura 17 - Bloco THD.....	40
Figura 18 - Componentes elétricos	41
Figura 19 - Bloco PS Harmonic Estimator	41
Figura 20 - Solver Configuration.....	42
Figura 21 - Simulação do inversor 3 kW com 20% da potência nominal.....	43
Figura 22 - Forma de onda da corrente sem filtragem do inversor de 3 kW.....	46
Figura 23 - Forma de onda da corrente após filtro de 3 ^a harmônica do inversor de 3 kW	47
Figura 24 - Forma de onda da corrente após filtro de 5 ^a harmônica do inversor de 3 kW	47

Figura 25 - Forma de onda da corrente após filtragem completa do inversor de 3 kW	48
Figura 26 - Forma de onda da tensão de saída na carga do inversor de 3 kW	49
Figura 27 - Forma de onda da tensão de saída após ajuste da resistência do inversor de 3 kW	49
Figura 28 - Forma de onda da corrente após filtragem completa do inversor de 3 kW	50
Figura 29 - Forma de onda da corrente sem filtragem do inversor de 3 kW.....	50
Figura 30 - Comparação das formas de onda da corrente de entrada e após filtragem completa do inversor de 3 kW	51
Figura 31 - Forma de onda da tensão de saída do inversor de 3 kW	52
Figura 32 - Níveis de distorção harmônica no inversor de 3 kW com 20% da potência nominal.....	52
Figura 33 - Simulação do inversor de 3 kW com 75% da potência nominal.....	56
Figura 34 - Níveis de distorção harmônica no inversor de 3 kW com 75% de potência	57
Figura 35 – Forma de onda da corrente de saída sem filtragem e com filtragem completa do inversor de 3 kW com 75% de potência nominal	58
Figura 36 – Forma de onda da tensão de saída na carga do inversor de 3 kW com 75% de potência nominal	59
Figura 37 - Níveis de distorção harmônica no inversor de 3 kW com 75% de potência	59
Figura 38 - Simulação do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal.....	63
Figura 39 - Comparação da corrente sem filtragem e com filtragem completa do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal.....	64
Figura 40 - Corrente de neutro dos filtros do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal.....	65
Figura 41 - Forma de onda da tensão de saída na carga do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal	65
Figura 42 - Simulação do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal.....	67
Figura 43 - Comparação da corrente antes e após o processo de filtragem do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal	67
Figura 44 - Forma de onda da tensão de saída do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal	68

Figura 45 - Forma de onda da corrente de neutro dos filtros do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal	69
Quadro 1 - Terminologia das grandezas referentes à distorção harmônica	20
Quadro 2 - Classificação das ordens harmônicas dos inversores de 3 kW e 20 kW sem filtragem.....	70
Quadro 3 - Classificação das ordens harmônicas dos inversores de 3 kW e 20 kW após filtragem.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites das distorções harmônicas em determinada tensão nominal.....	22
Tabela 2 – Limite de injeção de corrente contínua e harmônicos de corrente	22
Tabela 3 - Valores do filtro de 3ª harmônica do inversor de 3 kW.....	44
Tabela 4 - Valores do filtro de 5ª harmônica do inversor de 3 kW.....	45
Tabela 5 - Valores do filtro de 7ª harmônica do inversor de 3 kW.....	45
Tabela 6 – Distorção harmônica sem filtragem do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal	53
Tabela 7 – Distorção harmônica após H3 do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal.....	54
Tabela 8 – Distorção harmônica após H3 e H5 do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal	55
Tabela 9 – Distorção harmônica com filtragem completa do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal	55
Tabela 10 - Valores do filtro da 4ª harmônica do inversor de 20 kW.....	61
Tabela 11 - Valores do filtro de 7ª ordem do inversor de 20 kW	62
Tabela 12 - Valores do filtro de 11ª ordem do inversor de 20 kW	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

C - Capacitor

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

DHT - Distorção harmônica total

DIT - Distorção harmônica individual

DTT - Distorção harmônica total da tensão

GD - Geração distribuída

ICMS - Imposto sobre a circulação de mercadorias e prestação de serviços

IEA - Agência Internacional de Energia

IGTB - *Insulated gate bipolar transistor*

INEP - Instituto de Eletrônica de Potência

IRENA - *International Renewable Energy Agency*

L – Indutor

MOSFETS - *Metal oxide semiconductor field effect transistor*

PRODIST- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PROGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica

Pu – Por unidade

PWM - *Pulse Width Modulation*

R – Resistor

SFCR – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA	17
2.1.1	Carga linear e não linear	18
2.1.2	Distorções harmônicas	19
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	23
2.3	INVERSOR.....	23
2.3.1	Características Operativas do Inversor	24
2.3.2	Características de Controle Operacional	27
2.4	INJEÇÃO DE HARMÔNICAS NA REDE	28
2.4.1	Problemas Devido a Presença de Harmônicos	29
2.5	ANÁLISE DAS HARMÔNICAS GERADAS PELO INVERSOR	29
2.6	MÉTODOS DE REDUÇÃO DE HARMÔNICOS	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	CORRENTES HARMÔNICAS DOS INVERSORES.....	34
3.2	FONTE DE CORRENTE SENOIDAL	38
3.3	BLOCO PS SIMULINK CONVERTER.....	39
3.5	BLOCO THD.....	40
3.6	COMPONENTES ELÉTRICOS	40
3.7	BLOCO PS HARMONIC ESTIMATOR.....	41
3.8	SOLVER CONFIGURATION.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	PROJETO DO FILTRO DO INVERSOR DE 3 KW	44
4.1.1	Inversor de 3 kW (75% da potência nominal).....	56
4.2	PROJETO DO FILTRO DO INVERSOR DE 20 KW	60
4.2.1	Inversor de 20 kW (75% da potência nominal).....	66
5	CONCLUSÃO	73
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

A dependência da energia elétrica se torna cada vez mais evidente para a sobrevivência e comodidade do ser humano, e com o aumento populacional e de novas tecnologias, a tendência é elevar ainda mais a demanda energética. Com o decorrer dos anos, devido aos problemas ambientais e por ser um recurso finito, o uso de combustíveis fósseis começou a ser discutido, e em 1997 o mundo se sensibilizou, onde no Protocolo de Kyoto foi discutido sobre os problemas climáticos, em especial, o efeito estufa. A partir daí, buscou-se novas alternativas sustentáveis para suprir a necessidade de energia elétrica (FREITAS e FREDO, 2005).

O Brasil é uma referência quando se trata em fontes renováveis, tendo em vista que grande parte da geração é obtido a partir de fontes hidrelétricas. Porém com o passar do tempo torna-se inviável a criação de mais usinas, devido aos alagamentos decorrentes do represamento de rios, deslocação de populações ribeirinhas, questões latifundiárias e socioambientais, entre outros.

Em 2012, com a elaboração da Resolução Normativa nº482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu-se normas e regras, para micro e mini geração, onde viabiliza-se que consumidores passem a gerar sua própria energia. A partir dessa resolução foi permitindo o uso de Geração Distribuída (GD) para auxiliar a demanda de energia elétrica, sendo possível instalar em quase qualquer lugar. No início não houve uma grande expansão desse tipo de geração, porém com o passar dos anos começaram a surgir incentivos como, a realização do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (PROGD) e a isenção de ICMS sobre a energia solar, que se refere ao imposto sobre a circulação de mercadorias e prestação de serviços.

As gerações distribuídas são gerações descentralizadas, onde têm-se como objetivo fornecer energia elétrica para consumidores próximos a unidade geradora. No Brasil, a geração que atualmente possui maior ênfase é a fotovoltaica. O seu uso torna-se cada vez mais comum hoje em dia devido vários fatores, como a redução do custo das placas fotovoltaicas, inversores e custo de instalação. Diminuindo assim, o tempo de retorno do investimento inicial, além de trazer reduções nas faturas de energia elétrica, e colaborar com a preservação do meio ambiente.

O Brasil é um país privilegiado, pois além de possuir uma grande quantidade de lagos e rios, possui um grande potencial fotovoltaico devido sua grande extensão

territorial e ótimos índices de irradiação solar, por estar próximo à linha do Equador. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), o país recebe durante todo o ano, mais de 3 mil horas de brilho do Sol, correspondendo a uma incidência solar diária que pode ir de 4.500 a 6.300 Wh/m². Sendo a região nordeste com índice de irradiação médio de 5.520 Wh/m².dia, sudeste com 5.260 Wh/m².dia, centro-oeste com 5.200 Wh/m².dia, norte com 4.660 Wh/m².dia, e a região sul com 4.770 Wh/m².dia, onde tais índices estão em relação ao plano inclinado.

A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA - *International Renewable Energy Agency*), com a participação de 161 membros, foi criada para promover a transição, desenvolvimento e melhorias para um mundo com energia renovável. Onde de acordo com informações obtidas no site oficial observou-se um crescimento exponencial da energia fotovoltaica mundial, tendo em 2019 um valor aproximado de 578.553 MW de potência instalada. Sendo os 3 principais contribuintes, a China com 205.072 MW, Japão com 61.840 MW e Estados Unidos com 60.540 MW. O Brasil possui apenas 2.485 MW. Isso mostra o quanto o país pode crescer em termos de geração fotovoltaica, tendo em vista o seu grande potencial nesse segmento.

Ainda, no Brasil, em termos de geração distribuída, a energia fotovoltaica lidera de forma isolada em relação à todas as outras formas de geração, correspondendo atualmente cerca de 96,50% da produção distribuída. Esses números estão ligados à facilidade de instalação, confiabilidade, baixos ruídos e a redução constante nos preços de instalação e dos equipamentos. Em seguida, vem a geração termoelétrica com grande participação, as centrais geradoras hidrelétricas e por fim as eólicas (ANEEL, 2020c).

Apesar de ser liberado em 2012 a instalação de geração distribuída no país, não houve uma consolidação significativa devido seus altos preços de aquisição e teve uma crescente relevância em 2017, com um total de 1.159 MW de potência instalada, sendo a geração distribuída correspondendo à 16% de participação da geração total. Em 2018 houve um aumento de 8%. Já em 2019, ocorreu um aumento expressivo na geração distribuída no país com 1.987 MW de potência e em 2020 subiu para 45% da geração fotovoltaica total com um valor de 2.055 MW de potência instalada, mostrando dessa forma a evolução da energia solar no Brasil (ANEEL e ABSOLAR, 2020).

Atualmente a potência outorgada, ou seja, a potência que a usina foi autorizada a produzir de energia, no caso da fotovoltaica, corresponde à 10,58% de toda a matriz elétrica brasileira. A potência fiscalizada, é decorrente da potência gerada no momento de operação. Hoje em dia, a dependência das usinas hidrelétricas vem diminuindo com o aumento de fontes renováveis, com a geração eólica e fotovoltaica, diversificando assim a matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2020a).

Com a grande inserção de geração distribuída nos últimos anos, em especial a fotovoltaica, começam a surgir uma série de questionamentos, para analisar os impactos que elas causam na rede de distribuição de energia local. Sabe-se que o sistema de distribuição convencional foi dimensionado e projetado para o fluxo de energia ser unidirecional, sendo considerada uma topologia radial. Dentro deste contexto, alguns aspectos positivos e negativos destacam-se, dentre eles:

Os autores Dantas e Apolonio (2019), mostraram que os impactos negativos de maior interesse, são: regulação de tensão, distorção harmônica, fator de potência, afundamento e flutuação da tensão.

E como impactos positivos apresentaram o auxílio na redução da demanda, elevação da eficiência energética, redução de perdas na transmissão e distribuição da energia elétrica (BARATA et al., 2017).

Devido a esses problemas é de suma importância, fazer uma análise da qualidade da energia diante à instalação da geração distribuída, tendo em vista que devem atender aos requisitos do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), o qual estabelece valores mínimos e máximos relativos à qualidade de energia, além de terminologias e metodologias de apuração e cálculo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido a necessidade da conversão de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos, o inversor em seu processo de modulação gera harmônicos durante o processo de chaveamento dos semicondutores de potência, o que pode alterar a qualidade da energia elétrica local.

O presente trabalho de conclusão de curso vislumbra avaliar os impactos das harmônicas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, quando o inversor opera abaixo de sua potência nominal, gerando distorções harmônicas de maior proporção.

Nesse estudo, são considerados inversores de diferentes potências para analisar as principais harmônicas geradas até a de 25ª ordem, para posteriormente, recriar a forma de onda de saída do inversor com a utilização da ferramenta Simulink, disponível no *software* MATLAB®. A forma de onda simulada será utilizada para o projeto de um filtro sintonizado cujo seu objetivo é corrigir as distorções harmônicas para dentro dos limites admissíveis por norma.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar as principais ordens harmônicas geradas pelos inversores operando com baixa potência, de modo a atenuar as distorções harmônicas com a utilização do filtro sintonizado sendo considerado dois cenários operacionais.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Apresentar as formas de onda de tensão e corrente, provenientes dos inversores de 3 kW e 20 kW ambos operando com 20% e 75% da potência nominal, apresentados por Fortes (2016);
- b) Exibir as distorções harmônicas na rede elétrica devido a presença do gerador fotovoltaico, utilizando o MATLAB®;
- c) Analisar e validar o uso do filtro sintonizado RLC para a correção das distorções harmônicas, por meio de simulação computacional;
- d) Avaliar por meio dos índices de distorção harmônica, limitados por norma, o desempenho do filtro implementado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A ANEEL através do Módulo 8 do PRODIST, é responsável por estabelecer padrões e limites referentes à qualidade de energia elétrica, sendo de extrema importância para manter a integridade e bom funcionamento dos equipamentos elétricos, além de reduzir possíveis perdas elétricas.

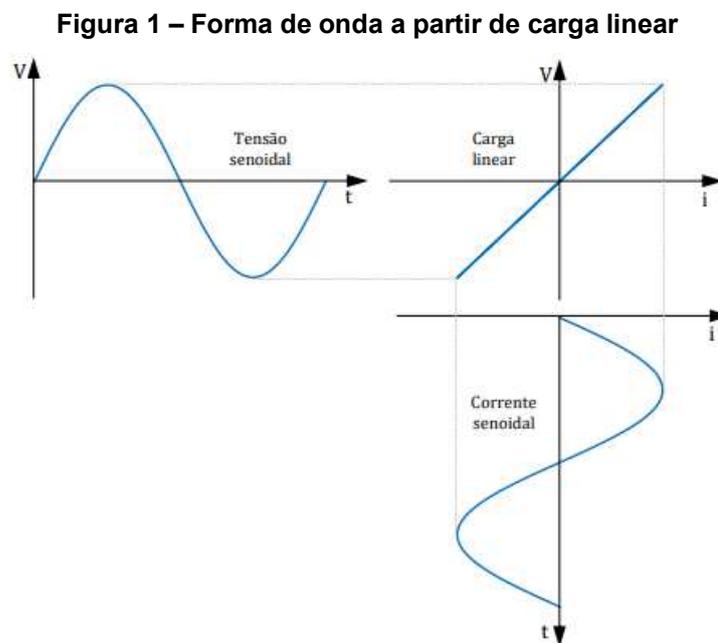
Problemas de qualidade e baixa eficiência energética, são relativamente comuns em ambientes industriais e comerciais, devido a presença de harmônicas na instalação (MARTINS, 2018). Com a grande inserção de energia fotovoltaica, se torna cada vez mais necessário, o estudo em ambientes residenciais, devido a presença do inversor fotovoltaico, o qual possui dispositivos eletrônicos, onde é realizado o chaveamento para transformar a corrente contínua em alternada. Durante esse processo, são gerados componentes harmônicos que prejudicam a qualidade da energia, o funcionamento de equipamentos, entre outros problemas decorrentes.

2.1 INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA

O módulo 8 do PRODIST é um documento desenvolvido pela ANEEL, padronizando e normatizando procedimentos relacionados à qualidade de energia elétrica, sendo composto por três seções: Qualidade do produto, qualidade do serviço e qualidade do tratamento de reclamações. A qualidade do produto define a terminologia, caracteriza os fenômenos e estabelece os limites relativos à tensão. A qualidade de serviço define os conjuntos de unidades consumidoras, os limites e procedimentos relacionados ao tempo de atendimento. E, a qualidade do tratamento de reclamações, estabelece os limites da frequência equivalente de reclamação para as distribuidoras. Neste trabalho de conclusão de curso, o foco será a seção de qualidade do produto. Na qual se trata dos fenômenos em regime permanente e transitório. É importante possuir uma boa qualidade de energia para que os equipamentos operem normalmente, sem a ocorrência de falhas provenientes de problemas na tensão, corrente, frequência, ou seja, falhas devidas o fornecimento da energia elétrica (ANEEL, 2020b).

2.1.1 Carga linear e não linear

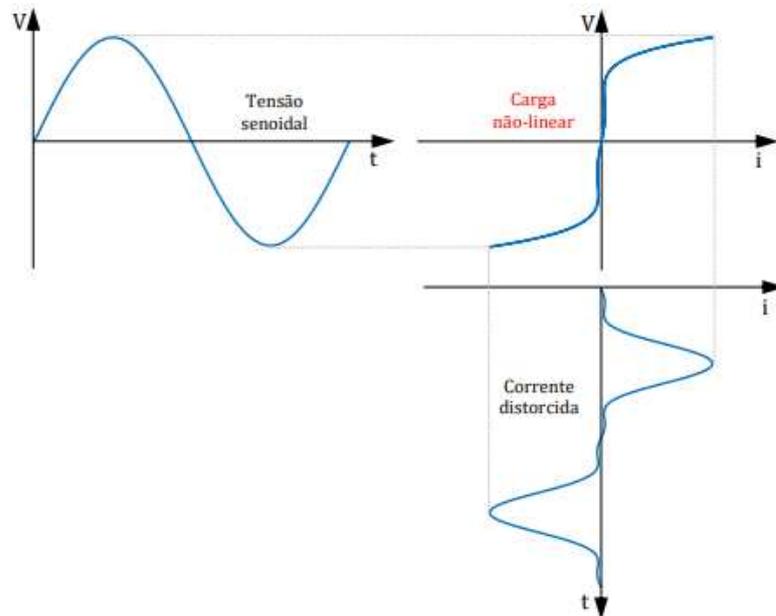
Cargas não lineares são definidas quando independente da alimentação de entrada, em geral senoidal, sua forma de onda de saída é distorcida, podendo ser a corrente e/ou tensão (ROCHA, 2017). Diferentemente das cargas lineares onde a corrente flui proporcionalmente à tensão aplicada. Na Figura 1, ilustra-se a forma de onda senoidal na fonte de alimentação, a forma de onda da carga linear e a resposta do circuito, após a interação com uma carga linear.



Fonte: FORTES (2018).

Já com as cargas não lineares, como o valor da impedância varia ao passar do tempo, sua forma de onda se torna irregular e distorcida, como ilustra-se na Figura 2.

Figura 2 - Forma de onda a partir da carga não linear



Fonte: FORTES (2018).

Observa-se na Figura 2, a forma de onda senoidal na entrada, a forma de onda da carga não linear e que após este sinal percorrer a carga não linear, tem-se como resposta uma onda senoidal distorcida.

Alguns exemplos de carga não lineares são: conversores/inversores de frequência, retificadores, fornos a arco e indução, transformadores com o núcleo saturado, *no-breaks*, controladores tiristorizados, fontes chaveadas, microcomputadores, entre outros (ENGELÉTRICA, 2011).

Em regime permanente, cargas não-lineares geram novas frequências, as quais são múltiplas da fundamental. Quando requeridas são adicionadas à forma de onda, junto com a frequência fundamental, gerando uma forma de onda distorcida (FORTES, 2018).

2.1.2 Distorções harmônicas

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal de frequência fundamental (ANEEL, 2020b). As harmônicas podem ser representadas matematicamente através da Transformada de Fourier, onde uma forma de onda fundamental senoidal é somada por várias ondas senoidais puras com frequências múltiplas inteiras da fundamental. Em sistemas fotovoltaicos elas são geradas devido

ao método de modulação *Pulse Width Modulation* (PWM) realizado para a conversão da corrente contínua proveniente dos módulos fotovoltaicos, para corrente alternada. A modulação PWM é uma das formas mais eficientes de conversão de energia, pois é possível um controle flexível do valor médio do sinal. Porém, durante o seu processo de chaveamento, pode gerar harmônicos e ruídos, prejudicando a qualidade de energia (FORTES, 2018).

O Quadro 1, determina as terminologias aplicadas ao cálculo de distorções harmônicas. Nomeando cada símbolo, à sua respectiva identificação adequadamente, para melhor entendimento das expressões a seguir.

Quadro 1 - Terminologia das grandezas referentes à distorção harmônica

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DTT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica mínima	hmín
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_p_{95\%}$
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_i_{95\%}$
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_3_{95\%}$

Fonte: ANEEL (2020b).

As expressões para os cálculos das grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_l\%$ e $DTT_3\%$ podem ser calculadas respectivamente em (1), (2), (3), (4)

(5).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (1)$$

Sendo h = ordem harmônica individual.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (2)$$

onde:

h = ordens da harmônica de 2 até a hmáx. E hmáx varia conforme a sua classe. Para classe A (hmáx = 50) e classe S (hmáx = 40).

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (3)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, ...).

hp = máxima ordem par, não múltipla de 3.

$$DTT_l\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hi} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (4)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h = 5, 7, 11, 13, 17, ...).

hi = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (5)$$

Sendo:

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h = 3, 6, 9, 12, 15, ...).

h3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

De acordo com o Módulo 8, os limites do máximo valor da distorção harmônica total no sistema de distribuição são definidos conforme apresentado na Tabela 1. Onde é delimitado as distorções harmônicas de acordo com sua tensão nominal.

Tabela 1 – Limites das distorções harmônicas em determinada tensão nominal

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
<i>DTT</i>_{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
<i>DTT</i>_p95%	2,5%	2,0%	1,0%
<i>DTT</i>₁95%	7,5%	6,0%	4,0%
<i>DTT</i>₃95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2020b).

A NBR 16149/2013 desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em conjunto com o Instituto de Eletrônica de Potência (INEP), dispõe as características para conexão de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica de distribuição. Os limites de distorção harmônica individual de corrente podem ser observados na Tabela 2. Além disso, observam-se também os limites das harmônicas ímpares e pares de acordo com sua ordem harmônica, além de limitar o valor de injeção de corrente contínua e a distorção harmônica total.

Tabela 2 – Limite de injeção de corrente contínua e harmônicos de corrente

Critério	Limite
Injeção de componente CC na rede elétrica	< 0,5%
Distorção harmônica total	< 5,0%
Harmônicos ímpares – 3º a 9º	< 4,0%
Harmônicos ímpares – 11º a 15º	< 2,0%
Harmônicos ímpares – 17º a 21º	< 1,5%
Harmônicos ímpares – 23º a 33º	< 0,6%
Harmônicos pares – 2º a 8º	< 1,0%
Harmônicos pares – 10º a 32º	< 0,8%

Fonte: ABNT (2013).

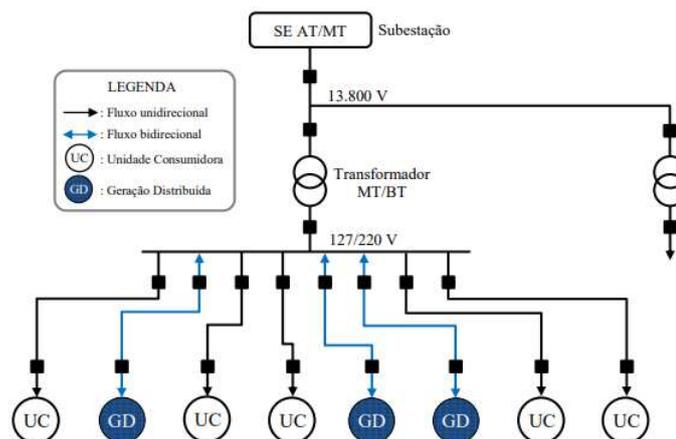
Conforme pode ser notado mediante a Tabela 2, em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, a distorção harmônica total máxima deve ser inferior a 5% da corrente fundamental em condições nominais de operação (ABNT, 2013).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Com a crescente preocupação por questões ambientais e sustentáveis, a procura por Geração Distribuída (GD) sofreu um grande aumento como uma alternativa de geração e suporte da demanda energética. São fontes descentralizadas, de pequeno porte, conectadas ao longo do sistema de distribuição. A GD como fonte de energia, foi incentivada pela Resolução Normativa da ANEEL nº482/2012, onde permite a micro e minigeração conectada à rede de distribuição, sendo instalado na unidade consumidora, podendo agir como consumidor ou produtor de energia elétrica.

Considerando todas as opções de energia renovável, as mais utilizadas no mundo são a energia solar e a eólica. Tendo como vantagens, o abastecimento de energia, aumento da eficiência, além de diminuir a demanda para construção e aumento linhas de transmissão e de construção de usinas de fontes não renováveis. A Figura 3, mostra o sistema de elétrico com geração distribuída.

Figura 3 - Sistema elétrico com geração distribuída



Fonte: FORTES (2016).

2.3 INVERSOR

Um dos equipamentos essenciais para os sistemas fotovoltaicos são os inversores, tendo como principal função, receber a corrente contínua proveniente dos

painéis solares e realizar a conversão para em corrente alternada, para que seja possível sua utilização na residência ou o excedente transferido para a rede elétrica.

Segundo Pomilio (1998) o inversor deve ser capaz de fornecer uma tensão de qualidade aceitável, ou seja, em concordância com as normas vigentes. Quando o inversor estiver conectado a uma rede de distribuição CA, sabendo que a tensão de referência é definida pelo sistema ao qual está conectado, o inversor é responsável pela injeção (ou absorção) de corrente e, conseqüentemente, de potência na rede.

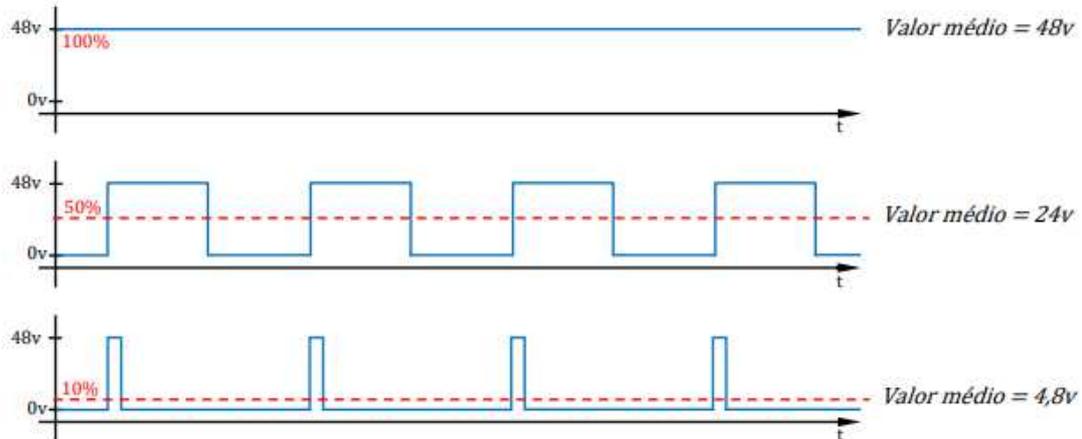
Outra função essencial do inversor fotovoltaico além da conversão de energia, é a detecção contra ilhamento, onde é feita a conexão ou desconexão do sistema em razão de algum problema decorrente da concessionária, sendo de extrema importância desenergizar ou não a rede de distribuição, evitando possíveis problemas, como em possíveis choques em manutenções na área e danificação de equipamentos do consumidor, devido à ausência da referência de tensão do sistema (FORTES, 2018) e (SAMPAIO, 2013). Outra função é a existência do máximo aproveitamento do sistema do gerador fotovoltaico, com o rastreamento do ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos, sigla em inglês MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).

Para melhorar a forma de onda de saída do inversor, podem ser utilizados filtros indutivos e capacitivos. De modo a eliminar as harmônicas e possíveis ruídos provenientes do inversor (ATHOS, 2020).

2.3.1 Características Operativas do Inversor

A modulação por largura de pulso, sigla em inglês (PWM), permite por meio de ondas retangulares com período constante, a variação do valor médio da forma de onda de saída, a partir da variação do tempo de condução dos semicondutores de potência, ou seja, a variação da largura do pulso em alta frequência, alterando somente a duração que esse sinal é ativo. Sendo melhor observada na Figura 4.

Figura 4 - Valores médios por largura de pulso

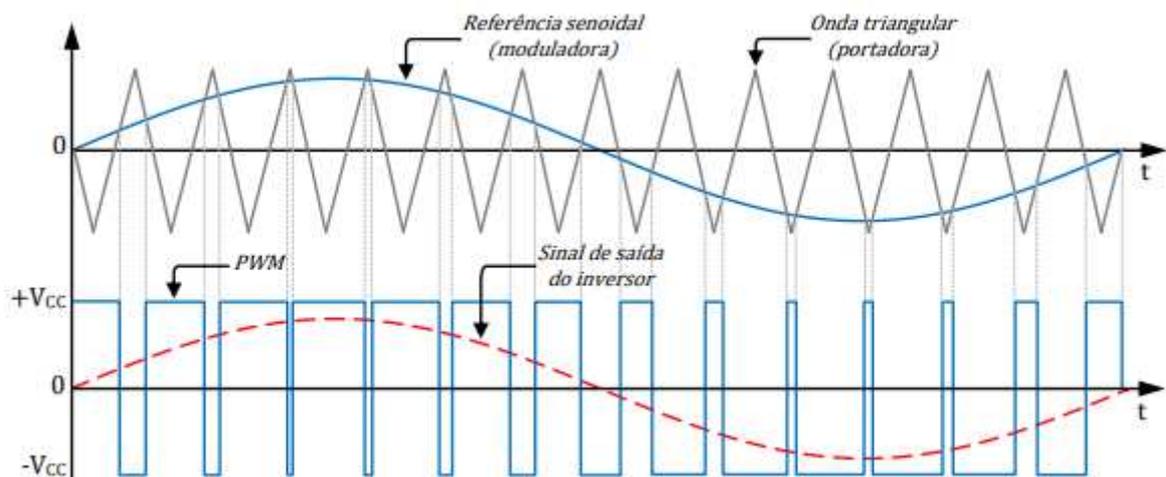


Fonte: FORTES (2016).

Para reproduzir uma forma de onda, deve ser feito o controle das chaves, de modo a permitir a passagem da corrente por determinado tempo, para controlar o valor médio requerido. Por exemplo, para obter o valor de 4,8 V na Figura 4, a chave deve permanecer ativa por 10% do tempo total do período.

Na Figura 5, pode ser observado o sinal SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*), com o auxílio das formas de ondas de referência e triangular. Pode-se notar que quando o sinal modulador é igual ao sinal da portadora, ocorre o acionamento ou não dos interruptores, se o valor da onda portadora é superior ao valor da onda moduladora, o sinal digital é "0", ou seja, ocorre a abertura dos dispositivos comutadores e vice versa, controlando assim o sinal PWM, para poder obter uma forma de onda senoidal na saída do inversor.

Figura 5 - Modulação do sinal senoidal PWM em 2 níveis



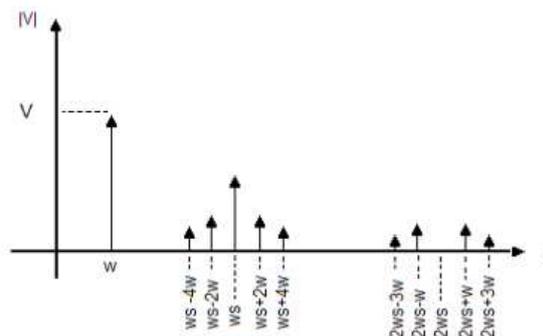
Fonte: FORTES (2016).

A modulação é feita comparando-se à uma tensão de referência, onde a frequência de comutação dos interruptores é controlada pela frequência do sinal triangular (portadora). E o sinal senoidal de referência estabelece a frequência de saída do inversor.

A frequência da onda triangular (portadora) deve ser aplicada em alta frequência, em geral no mínimo 20 vezes o valor da frequência da onda moduladora, para ser reduzido o conteúdo harmônico e tenha uma reprodução do sinal mais completa (POMILIO, 1998).

Quando utilizada uma tensão de referência igual a $V_{ref} = V * \cos(\omega t)$, e o sinal da portadora triangular, obtêm-se o seguinte espectro em relação à tensão, observado na Figura 6.

Figura 6 - Espectros de tensão moduladora com a portadora triangular



Fonte: KOMÁTSU e JÚNIOR (2011).

Com a análise da Figura 6, observa-se que a amplitude da componente fundamental, é de mesmo valor que a amplitude V da referência, e durante o processo de modulação, ocorre a geração de harmônicos de alta frequência, que aparecem centrados nos múltiplos de frequência de chaveamento (ws) dos dispositivos comutadores, variando dependendo da frequência fundamental (w).

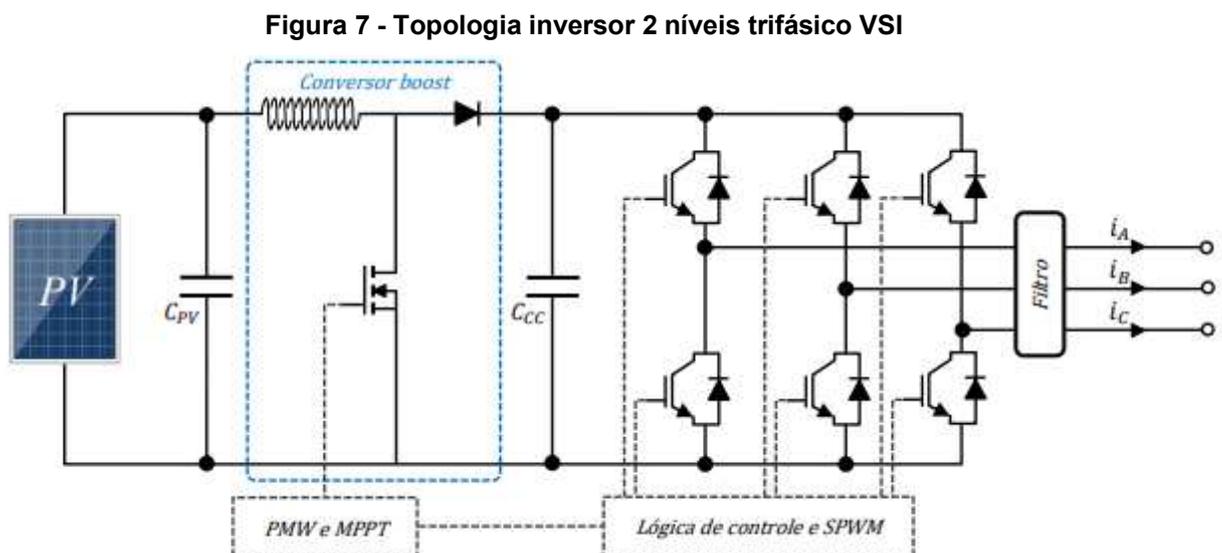
Como mencionado anteriormente, é necessário que a frequência de chaveamento seja em alta frequência, para que o dimensionamento do filtro seja menor, e as harmônicas geradas tenham baixo impacto na frequência fundamental do sistema.

2.3.2 Características de Controle Operacional

Os inversores fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com a alimentação no barramento de entrada, podendo ser VSI (*Voltage Source Inverter*), ou CSI (*Current Source Inverter*). O mais utilizado em SFCR é o VSI controlada por corrente, devido a versatilidade operacional e eficiência na conversão, visando a corrente elétrica da rede como referência. O controle por corrente injetada é mais confiável, pois a corrente pode ser modulada de forma direta de acordo com a tensão da rede, garantindo a transferência de potência ativa. Além de possuir grande estabilidade frente a perturbações (FORTES, 2018).

A corrente de saída do inversor é sincronizada com a tensão da rede, quando a mesma passa por zero volt. O sincronismo é feito por uma malha na rede de distribuição, na qual identifica o ponto zero volt da tensão da rede, para enviar um sinal para o inversor, essa malha é conhecida como *phase-locked loop* (PLL) (OLIVEIRA, 2017) e (SAMPAIO, 2013).

A Figura 7 representa a topologia do inversor VSI trifásico com conversor *boost*. Mostrando seus principais componentes, como a fonte fotovoltaica, capacitores de desacoplamento, boost para MPPT, capacitores de armazenagem de onda, a topologia do inversor VSI trifásico, a presença da lógica de controle para o SPWM, e por último o filtro.



Fonte: FORTES (2018).

Na configuração acima, o capacitor C_{PV} , é responsável por minimizar a tensão de ondulação (*ripple*) da tensão fornecida pelas placas fotovoltaicas. O conversor *boost* CC/CC, eleva a tensão de entrada para que esteja dentro dos níveis adequados para o funcionamento do inversor, além da importante função de fornecer dados, e parâmetros para o rastreamento do ponto de máxima potência (sigla em inglês - MPPT), onde depende da menor ondulação possível para seu melhor funcionamento. Tendo em vista que o valor da tensão e corrente, depende da variação da incidência solar nas placas fotovoltaicas. O capacitor C_{CC} , visível após o conversor *boost*, tem a finalidade de fazer o desacoplamento entre o sistema de controle modulador e a parte CC. Como as chaves devem ser bidirecionais, os diodos em antiparalelos presentes entre o coletor e emissor do dispositivo são responsáveis pela condução da corrente de polaridade reversa. Sendo uma topologia trifásico VSI. Após a saída podem ser utilizados diversos arranjos de filtros podendo ser compostos de indutores e capacitores, com a função de filtrar as harmônicas de alta frequência, fornecendo uma corrente elétrica o mais próximo possível da senoidal (SAMPAIO, 2013) e (FORTES, 2018).

2.4 INJEÇÃO DE HARMÔNICAS NA REDE

A qualidade de energia em sistemas fotovoltaicos depende essencialmente dos inversores, como visto anteriormente devido ao processo de modulação não é obtida uma forma de onda senoidal perfeita, durante o processo de conversão. A geração de harmônicas provenientes dos inversores pode ser dividida em duas partes:

- Durante o controle da modulação PWM, é necessário um tempo de sobreposição para os comandos do dispositivo IGBT (*Insulated gate bipolar transistor*) como fonte de corrente, com o objetivo de garantir o fluxo contínuo do barramento CC. Sendo o equivalente ao tempo morto no conversor de fonte de tensão. O tempo morto é necessário para evitar o curto-circuito da fonte pelas chaves semicondutoras. Esse tempo gera harmônicos de baixa ordem, aparecem geralmente na ordem $6k \pm 1$, onde $k = 1, 2, 3, \dots, n-1$ (JÚNIOR et al., 2014). A ocorrência de correntes harmônicas de baixa ordem são provenientes de problemas na malha de controle e também na ligação de inversores em uma rede elétrica fraca ou com tensão distorcida (FORTES, 2018).

- Outro fator que interfere diretamente na geração dos harmônicos, é devido os períodos em que o inversor gera menos energia que a potência nominal. Isso ocorre em momentos de baixa insolação, decorrentes de algum fator externo como, em períodos de menor intensidade solar e sombreamentos, na qual é um fenômeno natural que pode ocorrer devido a presença de nuvens, prédios vizinhos, folhas de árvores, entre outros. Esse fenômeno deve ser amenizado, pois compromete a eficiência do MPPT, por se tratar de um arranjo em série, os fotodiodos das células fotovoltaicas ficam polarizados de modo reverso, gerando em seus terminais tensão, se comportando como carga, limitando a corrente do circuito (FORTES, 2018).

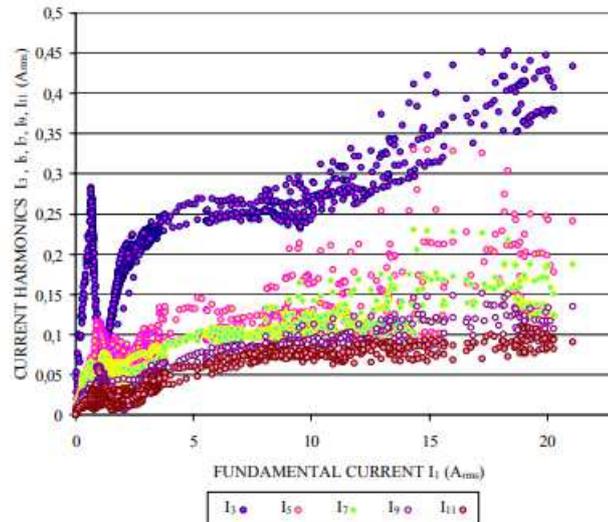
2.4.1 Problemas Devido a Presença de Harmônicos

A presença de harmônicos no sistema elétrico pode acarretar diversos problemas indesejados como por exemplo: Vibrações e ruído, sobreaquecimento de capacitores, sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos, erro na medição de grandezas elétricas, disparos de dispositivos de proteção, interferência e ruídos eletromagnéticos, entre outros (DECKMANN e POMILIO, 2010).

2.5 ANÁLISE DAS HARMÔNICAS GERADAS PELO INVERSOR

Segundo PAPAIOANNOU et al. (2008), os harmônicos de corrente de ordem 3, 5, 7, 9 e 11, são os que exercem maior influência na forma de onda de saída do inversor. Sendo que os harmônicos de ordem maior, oferecem menor interferência no sinal final. Na Figura 8 é ilustrada a relação entre os harmônicos de corrente em relação à corrente fundamental.

Figura 8 - Relação entre os harmônicos de corrente em relação à corrente fundamental



Fonte: PAPAIOANNOU et al. (2008).

As harmônicas de menor ordem possuem amplitudes maiores, como por exemplo a harmônica de 3ª ordem, atingiu amplitudes de 0,45 A e com o aumento das ordens, seu valor vai diminuindo, como na harmônica de 11ª ordem, que chegou a amplitudes de aproximadamente 0,12 A.

2.6 MÉTODOS DE REDUÇÃO DE HARMÔNICOS

Com a finalidade de melhorar a qualidade de energia elétrica dentro da GD, existem alguns métodos de filtragem que serão descritos a seguir.

Segundo Deckmann e Pomilio (2009), a utilização de filtros passivos é bastante utilizada para a atenuação de harmônicos e correção do fator de potência, nesse caso segundo os autores, geralmente estes filtros são conectados em derivação no alimentador.

O filtro passa-banda de simples sintonia é composto da ligação em série dos elementos RLC (Resistor, indutor e capacitor), na qual devem ser sintonizados nas frequências próximas à das harmônicas que se deseja eliminar. Os filtros oferecem passagem para as correntes harmônicas através de um caminho de baixa impedância. Para o seu dimensionamento são necessários definir alguns parâmetros, como o valor do fator de potência, fator de qualidade, valor da tensão de linha, potência do inversor, e a ordem harmônica que se deseja filtrar.

Primeiramente deve-se calcular a potência reativa do conjunto de filtros, sendo que isso é feito por meio da correção do valor do fator de potência do sistema. A partir daí pode-se calcular outras grandezas, como a tensão eficaz, que é definida pela expressão (6).

$$V_{ef} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

onde,

- V_L = tensão de linha.

Definido os valores da potência reativa monofásica do filtro, e a tensão eficaz, é possível obter o valor da reatância do mesmo por meio da expressão (7).

$$X_{eff} = \frac{V_{ef}^2}{Q_{fmonofiltro}} \quad (7)$$

onde,

- V_{ef} = tensão eficaz
- $Q_{fmonofiltro}$ = potência reativa monofásica do filtro

Obtido a reatância do filtro, calcula-se a reatância capacitiva dada pela expressão (8), a partir do valor da reatância total e a ordem harmônica do filtro.

$$X_C = \left(\frac{h^2}{h^2-1} \right) * X_{eff} \quad (8)$$

onde,

- h = ordem harmônica
- X_{eff} = reatância total do filtro

Com o valor da reatância capacitiva é possível calcular o valor da reatância indutiva, com o auxílio da expressão (9).

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (9)$$

onde,

- X_C = reatância capacitiva
- X_L = reatância indutiva

Por fim, calculam-se os valores dos parâmetros C, L e R dos filtros a partir dos valores das reatâncias visto nas expressões (10), (11) e (12).

$$C = \frac{1}{2\pi f * X_C} \quad (10)$$

$$L = 2\pi f * X_L \quad (11)$$

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (12)$$

onde, L o valor de indutância, C o valor da capacitância e R o valor da resistência.

O fator de qualidade (Q) para Tavares (2011) determina a faixa da variação da frequência em torno da frequência de sintonia. Seu valor é calculado através da expressão (13).

$$Q = \frac{\left(\sqrt{\frac{X_C * X_L}{X_L}}\right)}{R} \quad (13)$$

onde, X_C é o valor da reatância capacitiva, X_L é o valor da reatância indutiva e R é o valor da resistência do filtro.

Também há a presença de filtros de dupla sintonia, os quais operam da mesma maneira que dois filtros simples associados, tendo como vantagens: perdas menores e valores de impedância na frequência de ressonância menores. Nesse caso, eles consistem de um circuito LC em série, conectado com elementos RLC em paralelo. Considerando as frequências de sintonia f_1 e f_2 , sendo as frequências das harmônicas, calcula-se a frequência geométrica do conjunto através da expressão (14).

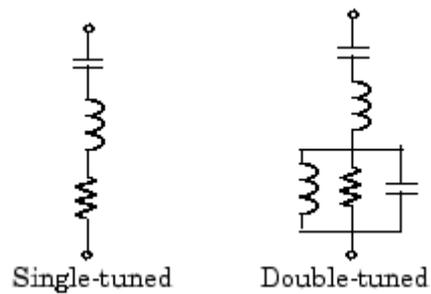
$$f_m = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (14)$$

O valor do fator de qualidade (Q) do filtro com dupla sintonia é definido pela expressão (15), utilizando os valores dos elementos em paralelo R e L.

$$Q = \frac{R}{(L * 2\pi * f_m)} \quad (15)$$

Na Figura 9, estão ilustrados o filtro simples e o filtro de dupla sintonia, conforme foram mencionados anteriormente.

Figura 9 - Filtro simples e filtro de dupla sintonia



Fonte: PEREIRA e PRATES (2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

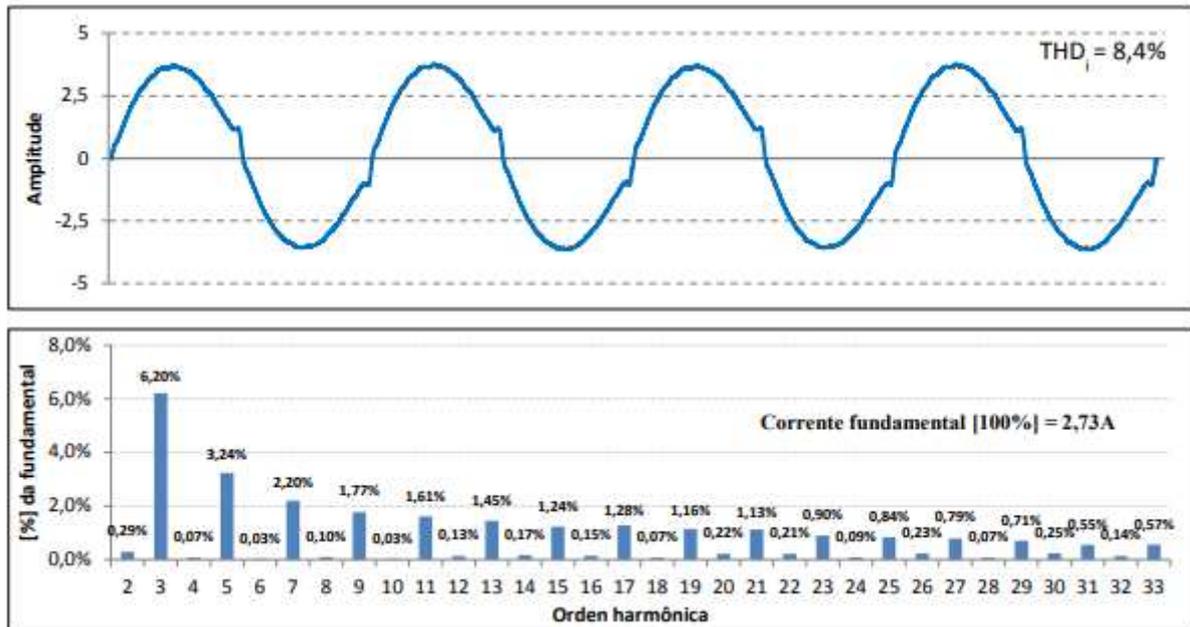
Para a representação Da forma de onda de saída do inversor utilizou-se uma ferramenta disponível no MATLAB®, o *Simulink*. Entre as opções de componentes disponíveis, utilizou-se os blocos da biblioteca do *Simscape*, que possui uma grande diversidade de fontes, componentes, medidores, entre outros elementos. Onde utilizou-se dados fornecidos por Fortes (2016) para a realização da forma de onda de saída do inversor para as simulações dos inversores de 3 kW e 20 kW, ambos operando com 20% e 75% de suas potências nominais.

3.1 CORRENTES HARMÔNICAS DOS INVERSORES

Os dados informados na Figura 10, em conjunto com a Figura 11, fornecem informações referentes as harmônicas de maior interesse na forma de onda de saída de um inversor com 3 kW de potência que serão utilizados para a simulações através do software *Simulink*.

De acordo com Fortes (2016), considerando um inversor de 3 kW operando com apenas 20% da potência nominal é possível verificar as influências das harmônicas na forma da corrente de saída do inversor de acordo com cada ordem harmônica, sua respectiva amplitude dada em porcentagem em relação à corrente fundamental.

Figura 10 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 20 % da potência nominal do inversor de 3 kW

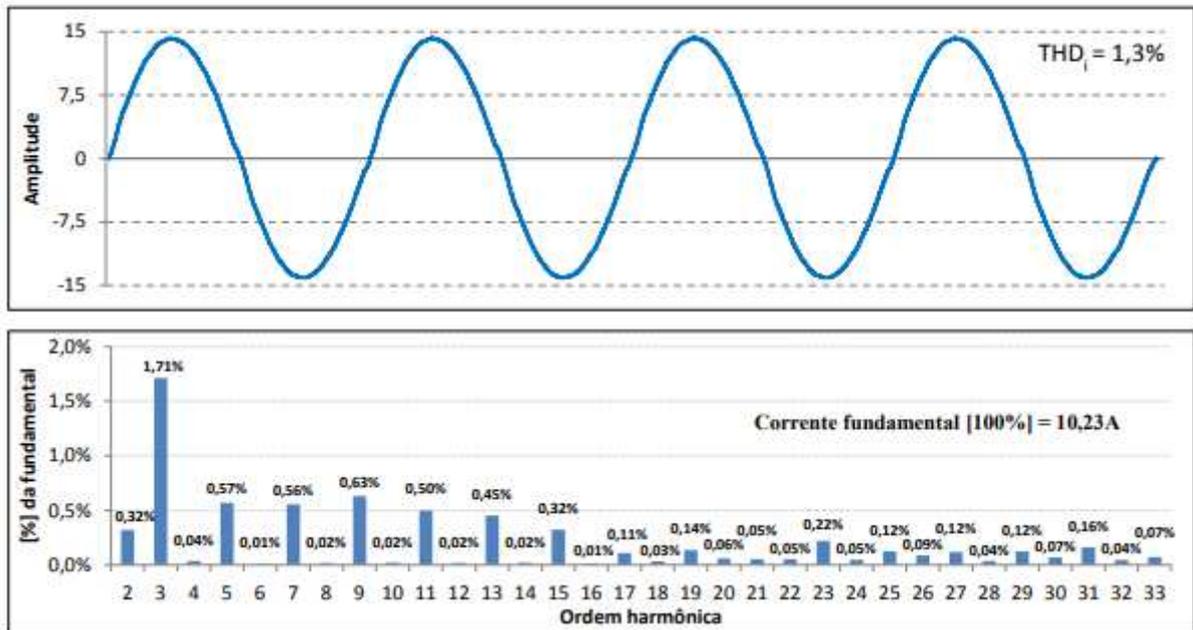


Fonte: FORTES (2016).

Na Figura 10 é possível notar que as harmônicas de menor ordem são ímpares e possuem maior impacto na corrente de saída, além disso, o valor de suas intensidades vai diminuindo com o aumento da ordem das harmônicas. Adicionalmente, verifica-se que neste caso, surgiu um DHT de 8,4%. Este índice é importante, pois o mesmo será utilizado neste trabalho para mensurar o desempenho do filtro a ser projetado para reduzir as distorções harmônicas.

Para o caso quando o mesmo inversor de 3 kW opera com 75% de sua potência nominal, as distorções harmônicas ocorrem conforme é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 75 % da potência nominal do inversor de 3 kW

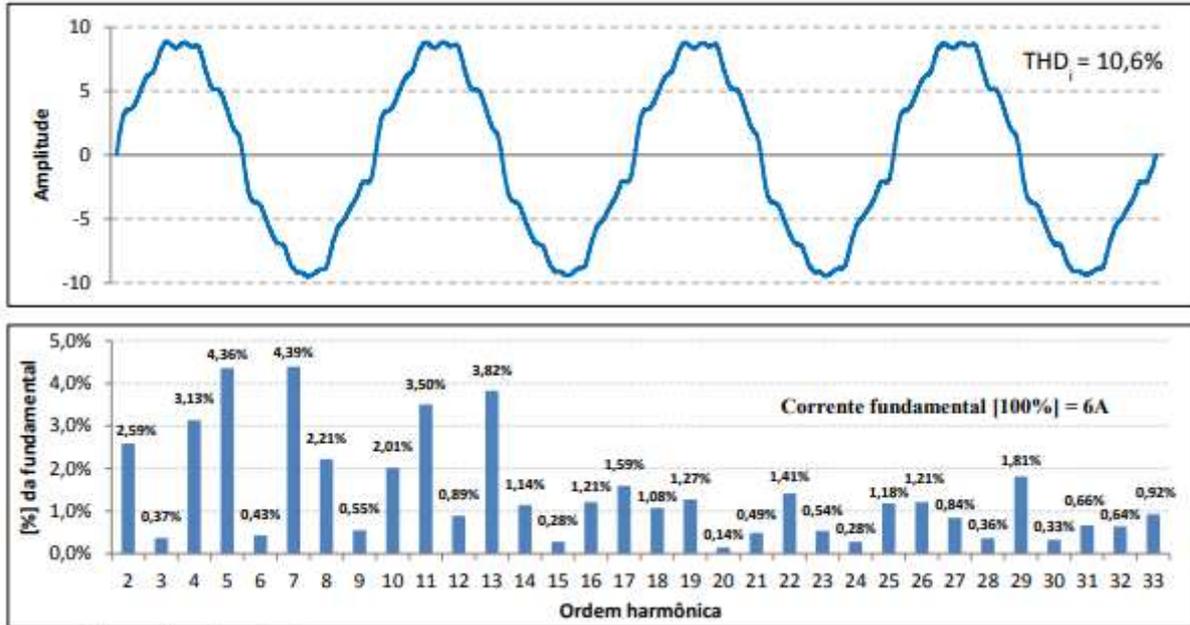


Fonte: FORTES (2016).

As informações anteriores são importantes para analisar as mudanças da forma de onda de saída após percorrer os filtros sintonizados, com a variação da potência nominal operativa do inversor. De modo a avaliar a qualidade do sinal, em ambos os casos.

Além disso, para fins de estudo, neste trabalho também é avaliado um inversor de 20 kW cujos dados são disponibilizados por Fortes (2016), sendo considerado operando com 20% da potência nominal, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 20 % da potência nominal do inversor de 20 kW

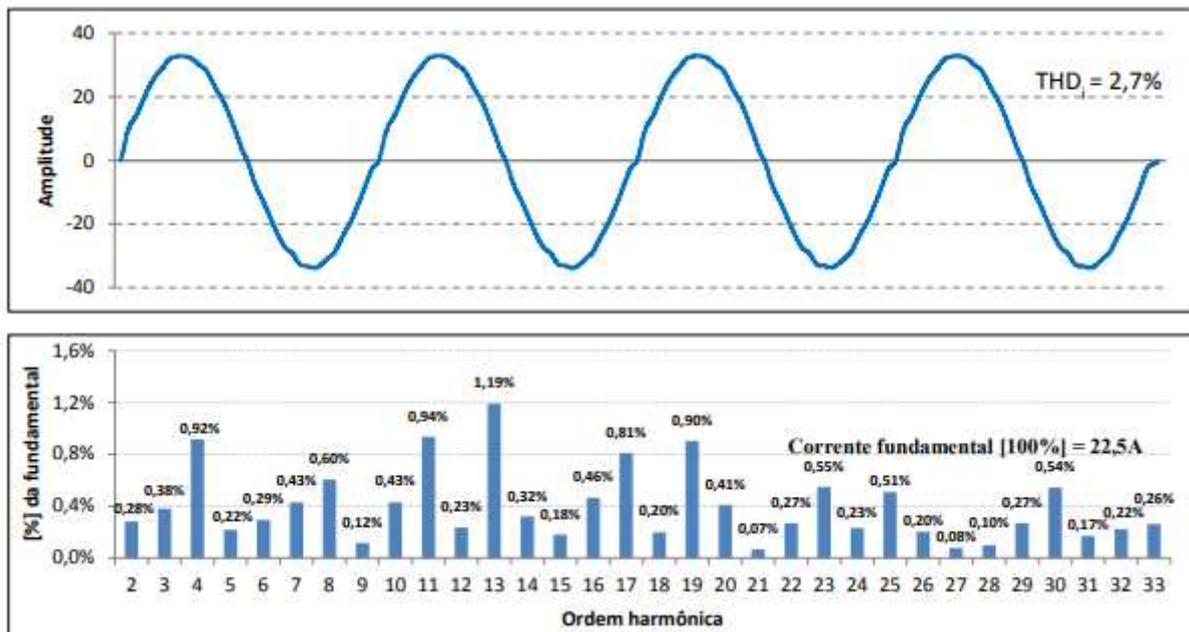


Fonte: FORTES (2016).

Verifica-se que devido a sua potência ser elevada, quando opera em condições muito abaixo de sua potência nominal, o nível das harmônicas presentes é mais elevado em relação ao inversor de 3 kW. Surgindo harmônicos de ordem ímpares e pares, pois este tipo de inversor é trifásico. Vale destacar que quando a corrente harmônica é injetada na rede elétrica local, a mesma pode ser prejudicial para os equipamentos ali conectados.

Quando operando com 75% de sua potência nominal, o inversor de 20 kW apresenta as distorções ilustradas por meio da Figura 13, demonstrando os valores das componentes harmônicas de acordo com sua ordem.

Figura 13 - Forma de onda e as harmônicas de corrente com 75 % da potência nominal do inversor de 20 kW



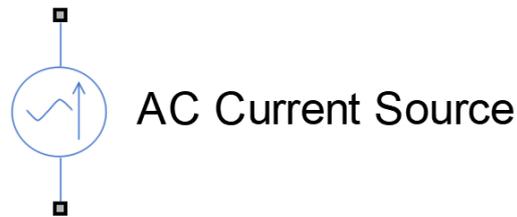
Fonte: FORTES (2016).

O modo operativo ocorre de forma similar ao inversor de 3 kW. A Figura 13 mostra suas harmônicas para o inversor de 20 kW operando com 75% de sua potência nominal, tendo várias harmônicas interessantes para o estudo, sendo importante para avaliar a resposta do sistema, com a utilização dos filtros sintonizados.

3.2 FONTE DE CORRENTE SENOIDAL

Nesse caso, empregou-se o uso de fontes de corrente senoidais, para representar a corrente de saída do inversor fotovoltaico. Para isso, definiu-se a corrente média através de uma fonte com a frequência da rede e para a inserção das harmônicas, fontes de corrente com a frequência múltipla da fundamental, variando de acordo com sua ordem.

Figura 14 - Fonte de corrente



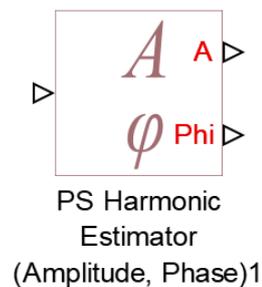
Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 14 representa a fonte de corrente alternada, possui dois terminais de ligação e para sua configuração se faz necessário definir os valores de amplitude e frequência.

3.3 BLOCO PS SIMULINK CONVERTER

Este bloco é um conversor de sinal físico, como os valores de corrente, para dados de saída do *Simulink*, necessários para que os sinais possam ser utilizados, trabalha juntamente com os dispositivos de medição de corrente e tensão. Sem este bloco não seria possível observar seus valores.

Figura 15 - Bloco PS Harmonic Estimator



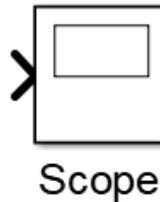
Fonte: Autoria própria (2021).

O sinal de entrada é obtido através de um medidor de corrente ou tensão, em sua configuração é necessário definir a frequência base, a harmônica que se deseja analisar e a amplitude mínima de detecção. Conforme a Figura 15, possui uma saída para os valores de amplitude e fase.

3.4 SCOPE

O elemento *Scope* é o *display* para apresentação de gráficos, e os valores simulados respectivamente, seus dados variam de acordo com a entrada.

Figura 16 - Scope



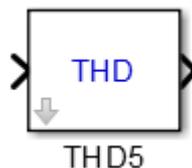
Fonte: Autoria própria (2021).

Observando-se a Figura 16, o bloco possui somente entradas, podendo ser de 1 a 96 entradas e exibe sinais no domínio do tempo com relação ao sinal aplicado.

3.5 BLOCO THD

O Bloco THD por sua vez, tem como função calcular a distorção harmônica total do sinal analisado, podendo ser da corrente ou tensão.

Figura 17 - Bloco THD



Fonte: Autoria própria (2021).

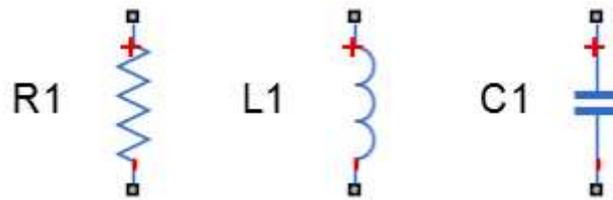
A Figura 17 mostra o bloco em questão, onde na entrada é o sinal a ser analisado, e na saída foi-se inserido um *display* para observar os valores.

3.6 COMPONENTES ELÉTRICOS

Os filtros sintonizados, são do tipo RLC série e são conectados em derivação na saída do inversor. Utilizou-se resistores, capacitores e indutores para a configuração do arranjo dos filtros, dependendo de seus valores e disposição, são

capazes de permitir a passagem de correntes indesejadas, melhorando a qualidade do sinal do sistema.

Figura 18 - Componentes elétricos



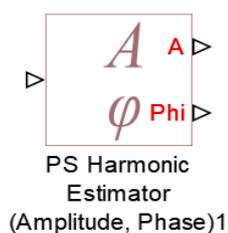
Fonte: Autoria própria (2021).

Utilizou-se resistências, capacitâncias e indutâncias para a realização da simulação do sistema, como pode-se observar na Figura 18.

3.7 BLOCO PS HARMONIC ESTIMATOR

Este bloco tem como função mensurar os valores da amplitude e fase de determinada ordem harmônica, na qual deve ser definido anteriormente em sua configuração, sendo útil para averiguar a intensidade das harmônicas no circuito elétrico.

Figura 19 - Bloco PS Harmonic Estimator



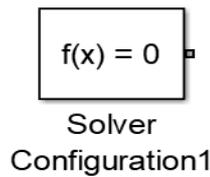
Fonte: Autoria própria (2021).

Deve-se definir alguns parâmetros para o funcionamento deste bloco, como a frequência base, e a ordem harmônica a ser analisada, a mostra Figura 19 com uma entrada e duas saídas, sendo uma para a amplitude e uma para a fase.

3.8 SOLVER CONFIGURATION

É necessário para especificar os parâmetros de resolução para a simulação do circuito, sendo indispensável quando utilizado blocos do *Simscape*, a Figura 20 demonstra este tipo de bloco.

Figura 20 - Solver Configuration



Fonte: Autoria própria (2021).

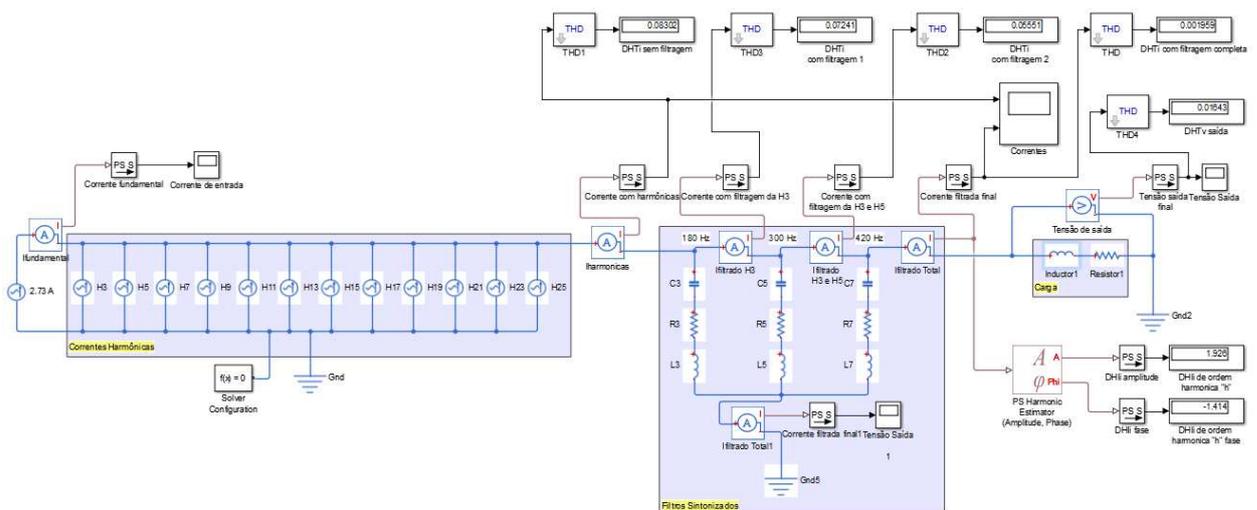
A cada topologia isolada é necessário a utilização de um bloco deste tipo, sendo conectado de maneira semelhante ao terra do sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O nível de distorção harmônica varia de acordo com a alteração da incidência solar, sendo que quanto maior a porcentagem da potência de funcionamento, em relação à potência nominal, menor será o nível das harmônicas e vice-versa. Considerando os piores casos, onde os níveis harmônicos estão acima do admissível por norma, geralmente inicia abaixo de 20% da potência, foi-se dimensionado o filtro para as harmônicas mais relevantes, posteriormente serão realizados de testes para observar se a forma de onda filtrada obteve valores coerentes de acordo com a norma.

Todos os elementos descritos no capítulo anterior estão ilustrados na Figura 21 e são utilizados para a simulação do circuito dos inversores.

Figura 21 - Simulação do inversor 3 kW com 20% da potência nominal



Fonte: Autoria própria (2021).

Para configurar as correntes harmônicas injetadas, utilizou-se as amplitudes apresentadas por Fortes (2016), com os valores da frequência referentes à sua ordem harmônica. Por exemplo, caso deseja-se inserir a harmônica de quinta ordem, a frequência a ser definida será $5 \times 60 = 300$ Hz, ou seja, sua ordem harmônica multiplicada pela frequência fundamental. Sendo assim, foram inseridas todas as correntes harmônicas definidas. Para o cálculo do filtro utilizou-se os valores da potência reativa do inversor, sendo dividida para o número de filtros sintonizados.

4.1 PROJETO DO FILTRO DO INVERSOR DE 3 KW

Para a realização do projeto do filtro do inversor de 3 kW, considerou-se os seguintes parâmetros e a seguinte sequência de dimensionamento:

Primeiramente deve-se calcular a potência reativa do conjunto de filtros, sendo feito a partir da correção do valor do fator de potência do sistema, tendo em vista que o fator de potência do inversor é muito próximo ao unitário. Neste caso, considerou-se uma correção para o valor de 0,98 indutivo. Após isso, é necessário definir a quantidade de filtros a serem utilizados, empregou-se então a divisão da potência reativa de maneira igual para a quantidade de filtros existentes.

Dados de projeto necessários para o cálculo do filtro:

- Fator de potência do filtro $fp = 0,9$ indutivo
- Ângulo teta do fator de potência $\theta = 25,8416327632^\circ$
- Potência aparente do filtro $S = 3333,33333$ VA
- Potência reativa do filtro $Q = 47,12$ VAr
- Potência ativa do filtro $P = 3kW$
- Tensão nominal de $V_n = 220$ V

e correção do fator de potência para 0,98; $P = 3$ kW; $V_n = 220$ V

Com a correção do fp obteve-se um valor de potência reativa total do conjunto de filtros de 843,79 VAr, sendo dividido para três filtros, resultando em 281,46 VAr para cada. E com as expressões (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12) e (13), resultou nas seguintes respostas, disponíveis na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 3 - Valores do filtro de 3ª harmônica do inversor de 3 kW.

Filtro 3ª harmônica						
Tensão eficaz (Vef)	Potência reativa filtro (Qfiltro)	Ordem harmônica (h)	Fator de qualidade (Q)	de	Frequência da rede (f)	
155,5635 V	281,263 VAr	3	45		60 Hz	
Reatância do filtro (Xeff)	Reatância capacitiva (Xc)	Reatância indutiva (XI)				

86,04047 Ohms	96,79553 Ohms	10,75506 Ohms
Capacitância (C)	Indutância (L)	Resistência (R)
2,74E-05 F	0,028529 H	0,717004 Ohms

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados do cálculo dos parâmetros do filtro para a 3ª harmônica, utilizando os dados de projeto escolhidos e considerando a harmônica de ordem 3, bem como, fator de qualidade de 45.

Tabela 4 - Valores do filtro de 5ª harmônica do inversor de 3 kW

Filtro da 5ª harmônica									
Tensão eficaz (Vef)	Potência reativa filtro (Qfiltro)	Ordem harmônica (h)	Fator de qualidade (Q)	Frequência da rede (f)					
155,5635 V	281,263 VAr	5	45	60 Hz					
Reatância do filtro (Xeff)	Reatância capacitiva (Xc)	Reatância indutiva (Xi)							
86,04047 Ohms	89,62549 Ohms	3,585019 Ohms							
Capacitância (C)	Indutância (L)	Resistência (R)							
2,96E-05 F	0,00951 H	0,398335 Ohms							

Fonte: Autoria própria (2021).

Para o dimensionamento do filtro de 5ª harmônica, utilizou-se os mesmos dados de projeto, alterando somente a ordem da harmônica. Tais resultados são destacados na Tabela 4.

Tabela 5 - Valores do filtro de 7ª harmônica do inversor de 3 kW

Filtro da 7ª harmônica									
Tensão eficaz (Vef)	Potência reativa filtro (Qfiltro)	Ordem harmônica (h)	Fator de qualidade (Q)	Frequência da rede (f)					
155,5635 V	281,263 VAr	7	45	60					
Reatância do filtro (Xeff)	Reatância capacitiva (Xc)	Reatância indutiva (Xi)							
86,04047	87,83298	1,79251							
Capacitância (C)	Indutância (L)	Resistência (R)							
3,02E-05	0,004755	0,278835							

Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, o último filtro utilizado no sistema do inversor de 3 kW é utilizado para harmônica de ordem 7. Os resultados obtidos estão apresentados no Tabela 5. Vale destacar, que à medida que as ordens harmônicas dos filtros vão se elevando, os valores dos parâmetros dos filtros tendem a diminuir.

De modo a analisar o sistema, considerou-se os valores da indutância para a carga igual a 0,01 H e a resistência para a carga igual a 2 Ohms. Assim foi possível obter os resultados descritos na sequência.

A corrente de saída do inversor sem filtragem pode ser observada na Figura 22, apresenta distorção harmônica em sua forma de onda, sendo que essas harmônicas são oriundas das fontes de corrente, as quais, para fins de simulação são definidas com os valores de uma determinada ordem harmônica.

Figura 22 - Forma de onda da corrente sem filtragem do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

Após passar pelo filtro de terceira harmônica, ocorre a deformação no sinal da corrente. Com alterações nos valores de pico, afunilamento dos valores máximos e mínimos e aumento do valor da corrente. A forma de onda, nesse caso, pode ser observada na Figura 23.

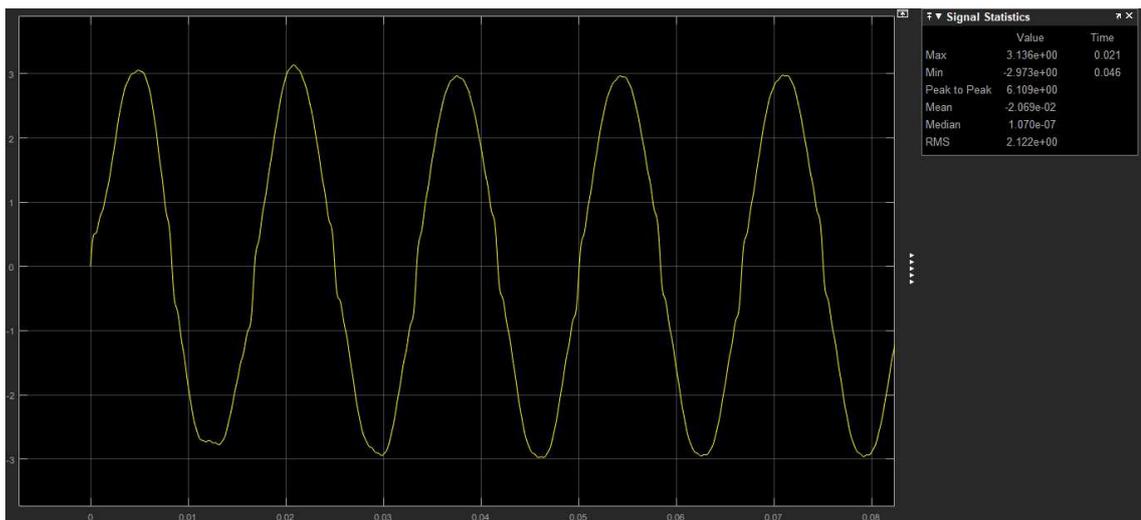
Figura 23 - Forma de onda da corrente após filtro de 3ª harmônica do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

Após passagem da corrente pelo filtro de 5ª harmônica houve um aumento do valor de pico no primeiro e segundo pico de corrente, posteriormente, se estabilizando. Nesse caso, ocorreu uma melhora na forma de onda e o arredondamento nas proximidades dos picos, assim como, a elevação do valor médio de corrente. A forma de onda em questão, pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 - Forma de onda da corrente após filtro de 5ª harmônica do inversor de 3 kW

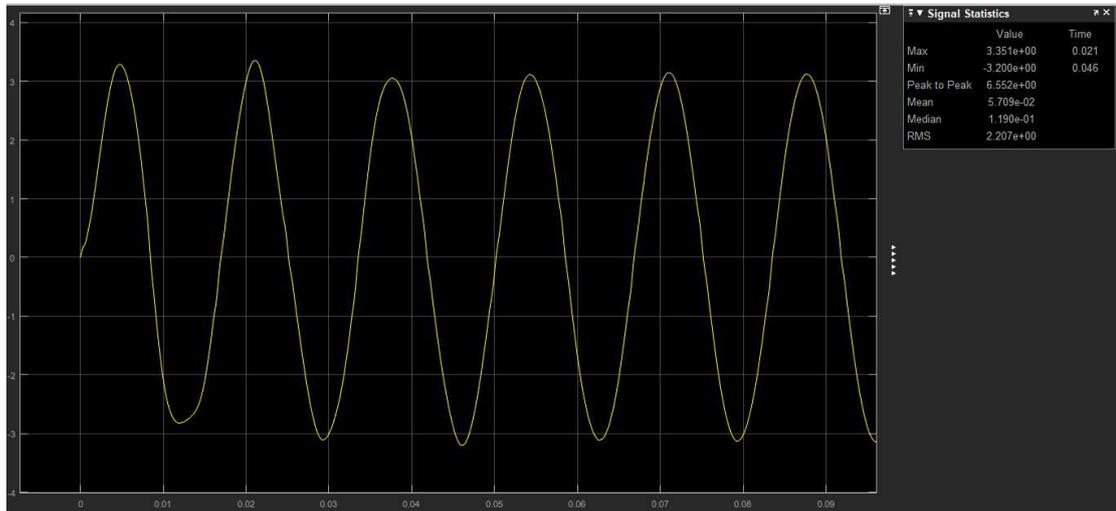


Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 25, apresenta-se a corrente de saída após a passagem por todos os filtros. Nesse caso, obteve-se um aumento do valor de pico na forma de onda da

corrente e em seu valor eficaz, houve também uma melhora perceptível na forma de onda sendo uma senoide quase perfeita.

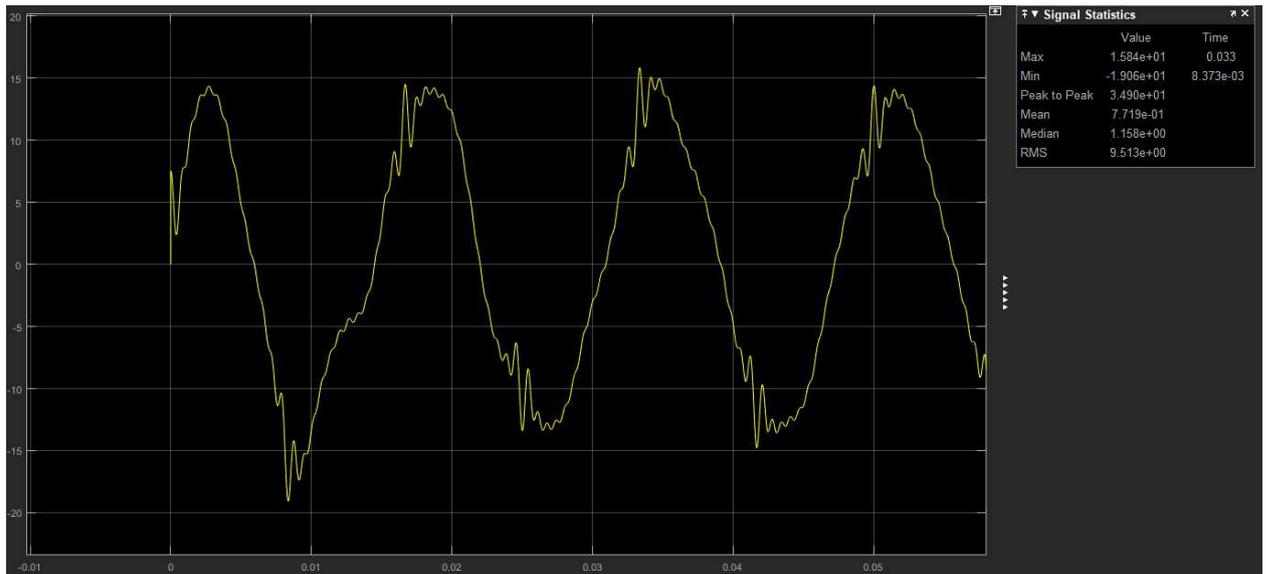
Figura 25 - Forma de onda da corrente após filtragem completa do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

A forma de onda da tensão de saída da Figura 26, encontra-se bastante distorcida, ou seja, com muita oscilação em seu formato. Isso ocorre devido ao valor da impedância da carga escolhido inicialmente ser extremamente baixa, o que representa na prática, uma operação em curto circuito. Nesse caso, as correntes harmônicas em conjunto com a fundamental, passam pela carga e não pelo filtro. Devido a esta situação foi necessário um atribuir um valor de impedância da carga que traduza, na prática, um cenário operacional que não seja um curto-circuito, ou seja, uma carga com valor maior que o inicial. Assim busca-se com esse novo valor de impedância, verificar melhor, o filtro atuando corretamente nas correntes do inversor.

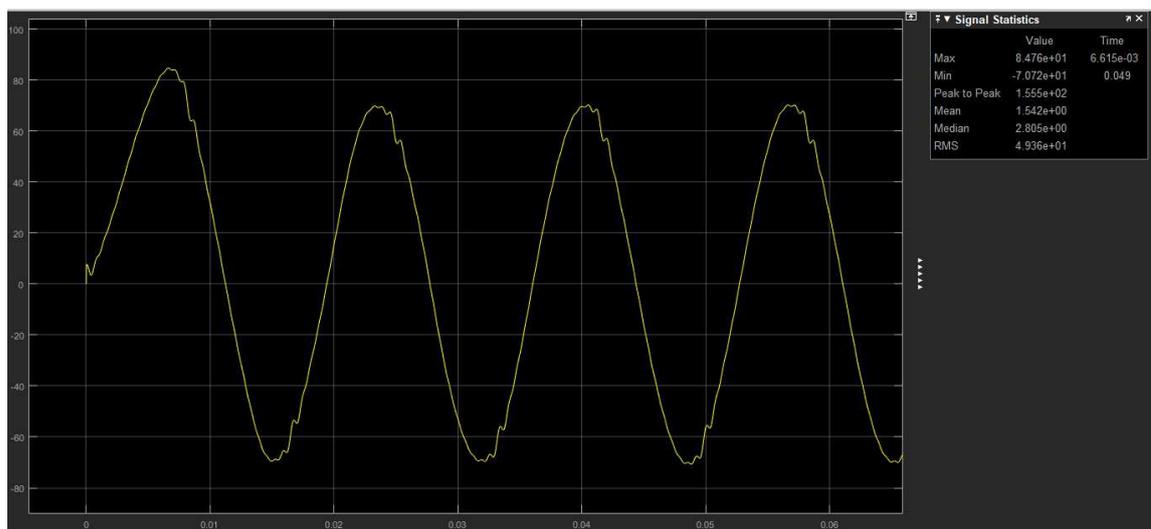
Figura 26 - Forma de onda da tensão de saída na carga do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

Com o aumento da resistência para 50 Ohms e mantendo o valor da indutância, a distorção da tensão de saída diminuiu consideravelmente, tendo um *overshoot* inicial relativamente alto, permanecendo ainda distorções evidentes conforme observadas na Figura 27.

Figura 27 - Forma de onda da tensão de saída após ajuste da resistência do inversor de 3 kW

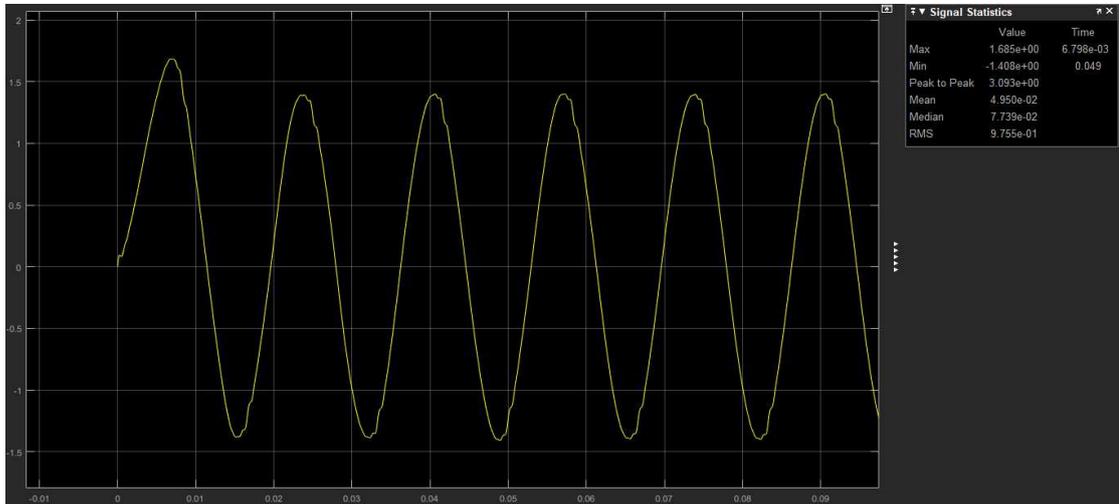


Fonte: Autoria própria (2021).

Observa-se na Figura 28, a corrente de saída após a filtragem. Nesse caso, encontra-se um *overshoot* inicial, o qual, se estabiliza posteriormente, tendendo para

uma forma de onda próxima de uma onda senoidal pura, com pequenas imperfeições próximas aos valores máximos e mínimos da onda senoidal.

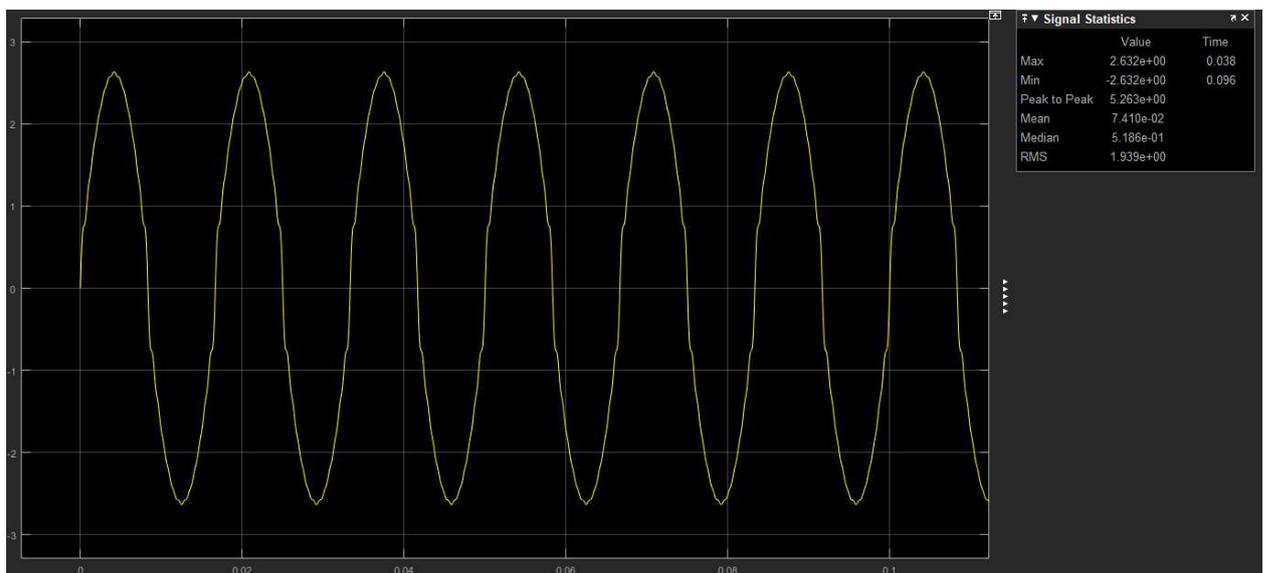
Figura 28 - Forma de onda da corrente após filtragem completa do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 29, a corrente de saída sem filtragem permanece a mesma, pois não foi alterado a corrente de saída do inversor, apenas os valores da carga do sistema.

Figura 29 - Forma de onda da corrente sem filtragem do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

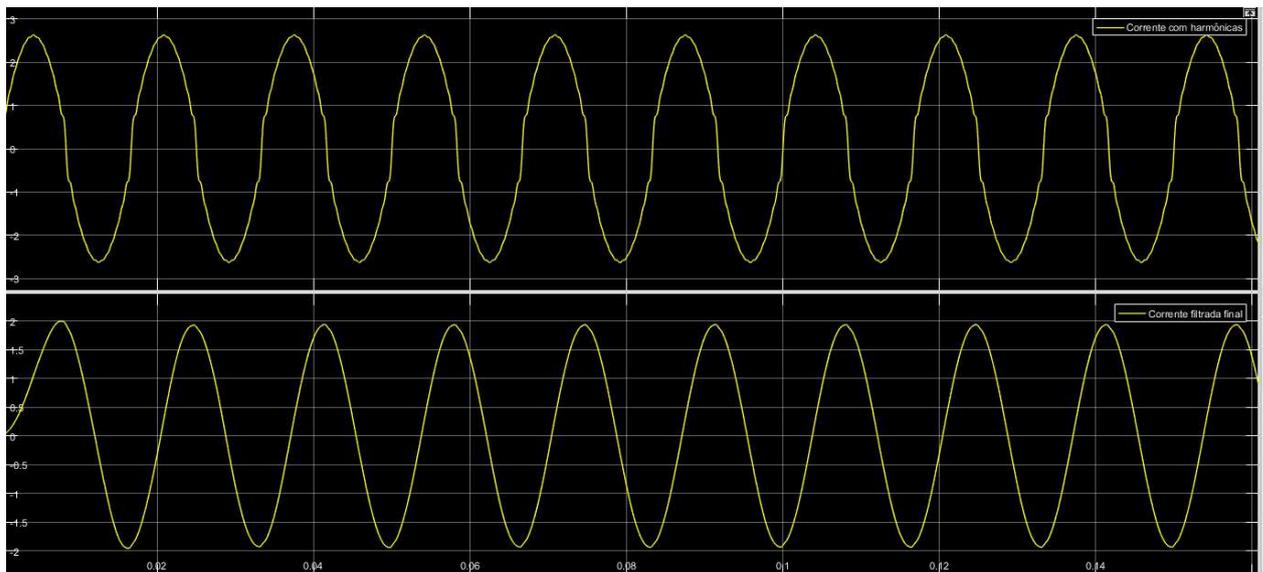
Observou-se que com o aumento da resistência da carga. Ela altera diretamente o valor da corrente de saída com filtragem, já que, naturalmente uma

carga maior demanda maior corrente do inversor. Quando possui um valor pequeno (2 Ohms), a tensão de saída na carga possui bastante distorção devido a passagem de harmônicos indesejáveis. Com o aumento da resistência para valores consideráveis (40 Ohms), a distorção da tensão foi reduzida consideravelmente. Alterou-se o valor do *overshoot* da corrente, com o aumento da resistência para valores acima de 40 Ohms. Para resistência abaixo de 40 Ohms, ocorre o *undershoot* da corrente.

O indutor, quando possui valor baixo causa um *overshoot* na corrente de saída do filtro, e um *overshoot* no valor da tensão do filtro.

Considerando agora, um valor de $L = 0,06$ H e $R = 40$ Ohms, a ilustra a corrente de saída do filtro após o processo de filtragem, em comparação com a corrente com as distorções harmônicas.

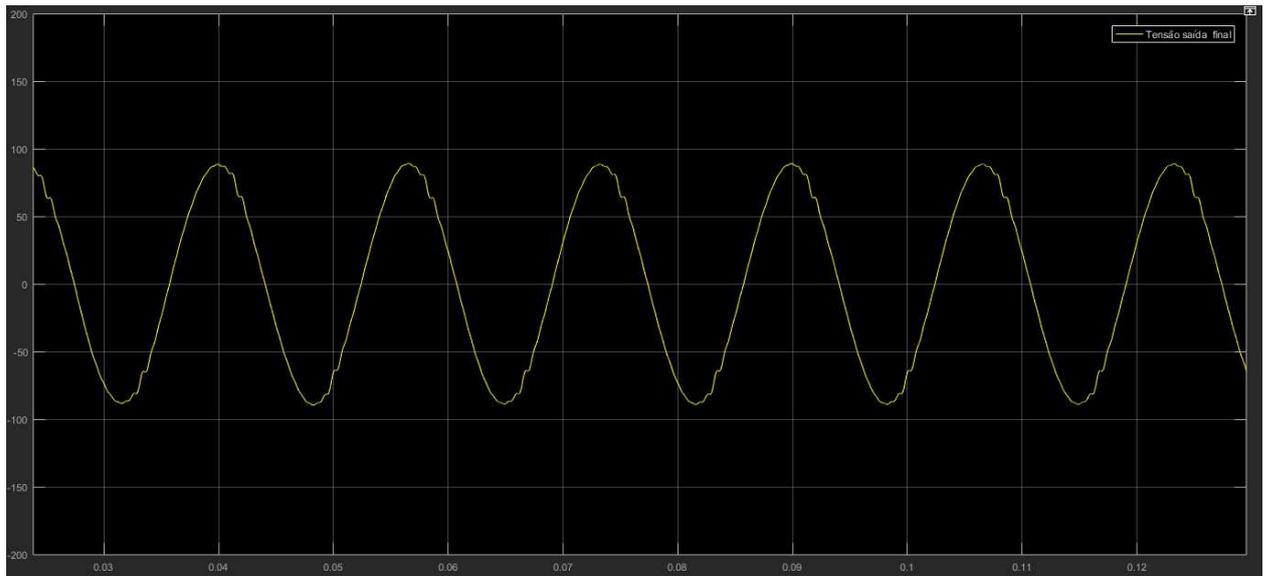
Figura 30 - Comparação das formas de onda da corrente de entrada e após filtragem completa do inversor de 3 kW



Fonte: Autoria própria (2021).

A corrente de saída do filtro sofreu uma grande melhora em seu sinal, tornando-se praticamente senoidal. Inicialmente seu valor de pico era de aproximadamente 2,5 A, sofrendo uma diminuição para 2 A, tendo em seu valor de fase, uma pequena defasagem como pode-se observar na Figura 30. Já a tensão de saída do filtro em regime permanente pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 - Forma de onda da tensão de saída do inversor de 3 kW

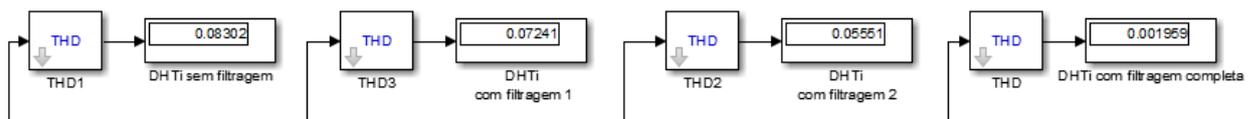


Fonte: Autoria própria (2021).

A tensão de saída do sinal na carga, apresenta uma pequena distorção em sua forma de onda e amplitudes em torno de 100 V.

Na Figura 32, que foram utilizados blocos de medição de DHT em vários níveis do circuito para mensurar a diminuição do conteúdo harmônico à medida que a corrente flui nos filtros sintonizados.

Figura 32 - Níveis de distorção harmônica no inversor de 3 kW com 20% da potência nominal



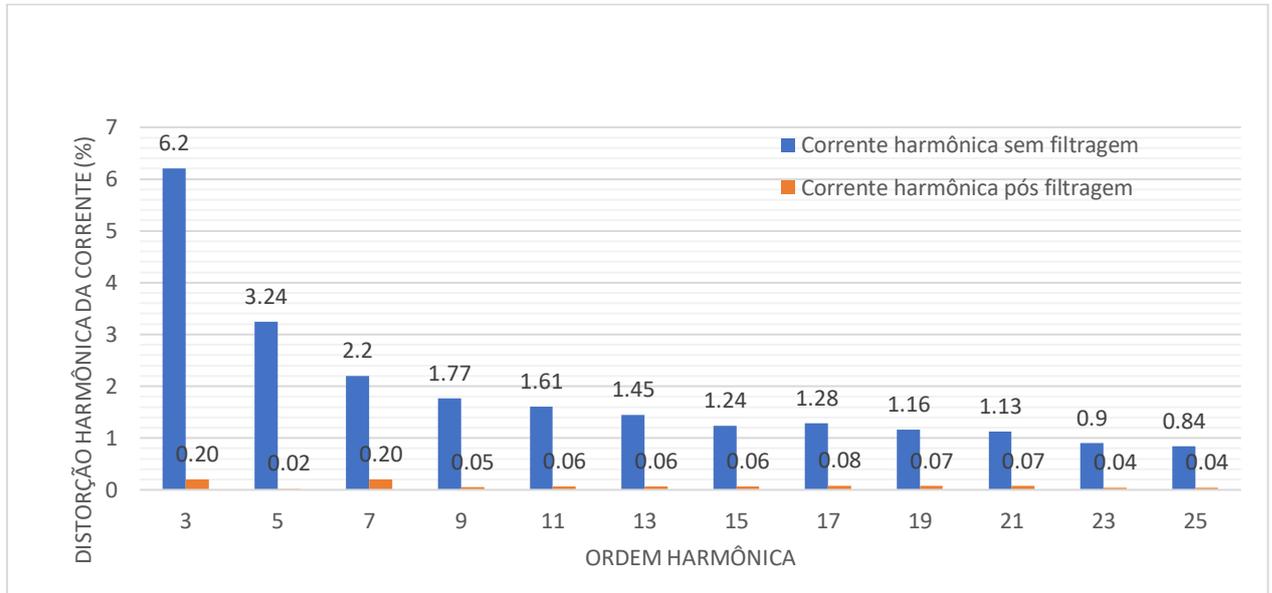
Fonte: Autoria própria (2021).

Ainda na Figura 32, os valores de cada bloco acima são de, 8,302% sem nenhuma filtragem, 7,241% com a filtragem da harmônica de terceira ordem, 5,551% após a filtragem da quinta harmônica, e após todo o processo de filtragem, obtém-se o valor de 0,019% de distorção harmônica total. Sendo bem abaixo do valor definido por norma que equivale a 5%.

Utilizando os dados obtidos por Fortes (2016) e os valores durante a simulação, pode-se realizar uma comparação dos valores das distorções harmônicas em porcentagem, em relação à sua ordem harmônica. No Gráfico 1 são apresentados os

níveis de distorções harmônicas e é possível observar uma grande diminuição das harmônicas com a utilização dos filtros sintonizados.

Gráfico 1 - Comparação dos níveis de harmônicas no inversor de 3kW com 20% da potência nominal



Fonte: Autoria própria (2021).

Para averiguar se as medidas obtidas pelo bloco DHT estavam coerentes, calculou-se o valor de DHT, a partir dos valores das correntes medidos durante a simulação. Os dados observados estão apresentados na Tabela 6. A fórmula para o cálculo da distorção harmônica total é definida pela expressão (16).

$$DHT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} I_h^2}}{I_f} * 100 \quad (16)$$

Sendo:

- I_f = Corrente fundamental
- h = ordem harmônica
- $hm\acute{a}x$ = ordem harmônica máxima

Tabela 6 – Distorção harmônica sem filtragem do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal

Medidas sem filtragem			
If (A)	Ih (A)	Harmônica (h)	DHT sem filtragem
2,73	0,1693	3	0,083023578
	0,08849	5	

0,06006	7	DHT (%)
0,048321	9	8,3
0,043953	11	
0,039585	13	
0,033852	15	
0,034944	17	
0,031668	19	
0,030849	21	
0,02457	23	
0,02265	25	

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Tabela 6 realizou-se o cálculo da distorção harmônica sem a realização da filtragem do sinal, analisando as correntes harmônicas individuais de 3ª ordem até a 25ª ordem. Com isso obteve-se um valor de distorção harmônica total de aproximadamente 8,3% utilizando a expressão (FD). Valor muito próximo ao medido pelo bloco DHT.

Tabela 7 – Distorção harmônica após H3 do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal

Medidas após H3			
If (A)	Ih (A)	Harmônica (h)	DHT filtro 1
2,017	0,01676	3	0,07225824
	0,08807	5	
	0,05992	7	DHT (%)
	0,04563	9	7,22
	0,04082	11	
	0,0364	13	
	0,03107	15	
	0,03185	17	
	0,02892	19	
	0,02806	21	
	0,02233	23	
	0,02094	25	

Fonte: Autoria própria (2021).

Após a passagem pelo primeiro filtro, ou seja, o filtro de 3ª harmônica, obteve os valores de corrente conforme é visto na Tabela 7. Tendo valor de DHT de 7,22%.

Tabela 8 – Distorção harmônica após H3 e H5 do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal

Medidas após H3 e H5			
If (A)	Ih (A)	Harmônica (h)	DHT filtro 2
1,681	0,006403	3	0,05567308
	0,003957	5	
	0,05988	7	DHT (%)
	0,03575	9	5,56
	0,03008	11	
	0,02617	13	
	0,02201	15	
	0,02246	17	
	0,02023	19	
	0,01959	21	
	0,01555	23	
	0,01499	25	

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Tabela 8, observam-se os dados obtidos após a passagem pelos filtros de 3ª e 5ª harmônica, tendo como resultado o valor de DHT de 5,56%.

Tabela 9 – Distorção harmônica com filtragem completa do inversor de 3 kW com 20% da potência nominal

Medidas finais			
If (A)	Ih (A)	Harmônica (h)	DHT filtrofinal
1,926	0,002535	3	0,008139914
	0,000308	5	
	0,000109	7	DHT (%)
	0,0012	9	0,81
	0,00133	11	
	0,001504	13	
	0,001496	15	
	0,001458	17	
	0,0013	19	
	0,001262	21	
	0,001197	23	
	0,01499	25	

Fonte: Autoria própria (2021).

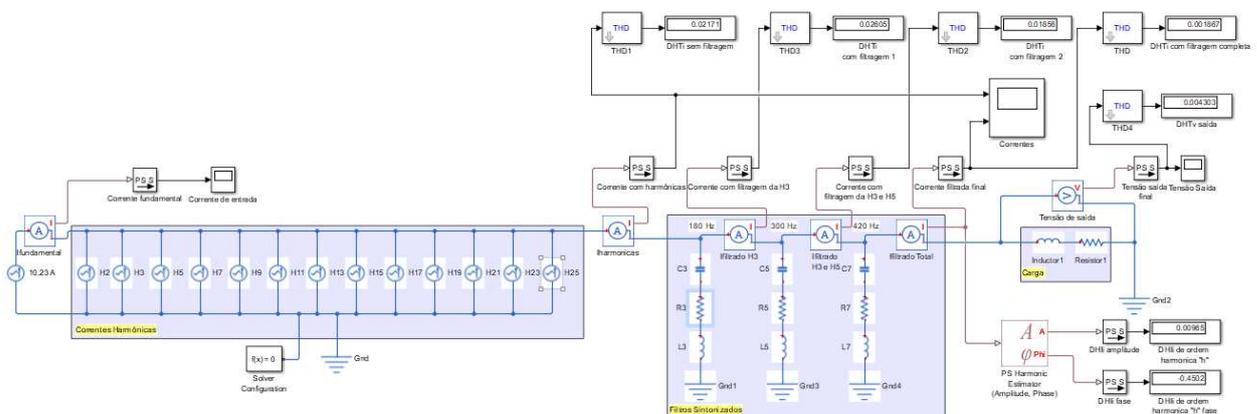
Após o processo completo de filtragem obteve-se os dados destacados na Tabela 9, tendo um valor de 0,81% de distorção harmônica total. Os valores obtidos com a utilização do bloco DHT, em relação ao calculado utilizando os valores das

correntes da simulação, resultaram em valores muito próximos, confirmando assim, as informações adquiridas.

4.1.1 Inversor de 3 kW (75% da potência nominal)

Com o aumento da irradiação solar, a potência de operação do inversor tende a aumentar, aumentando o nível de corrente e tensão do sistema. E consequentemente, como a distorção harmônica é inversamente proporcional ao valor da irradiância seu valor diminui de 8,3% para 2,17% de DHT, sem a necessidade de filtros. Os filtros foram projetados para as piores situações, ou seja, durante 20% da potência nominal. Nesse caso, foi avaliado o desempenho do filtro, durante os dois cenários. Foram alterados o valor da corrente fundamental e suas harmônicas conforme foi visto por Fortes (2016), assim como, analisou-se utilizando o mesmo filtro dimensionado anteriormente. Conforme pode-se observar na Figura 33 abaixo:

Figura 33 - Simulação do inversor de 3 kW com 75% da potência nominal



Fonte: Autoria própria (2021).

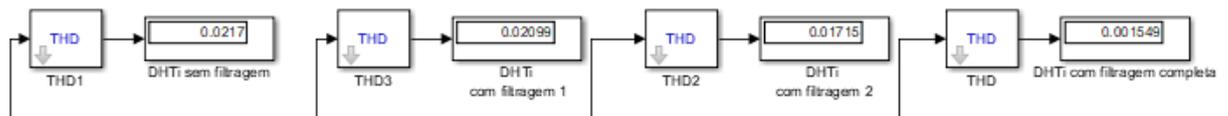
O valor da taxa de distorção harmônica total da corrente (DHTi), é indicado em várias partes do sistema, antes do filtro, após o filtro da harmônica de 3ª ordem, após o filtro da harmônica de 5ª ordem e após a filtragem completa. Os valores da DHTi são abaixo do permitido por norma mesmo sem a presença dos filtros. Com a inserção do filtro sintonizado, o nível das harmônicas se tornou quase nulo.

Observa-se que durante o primeiro processo de filtragem, houve um aumento da DHTi, isso ocorre devido ao filtro da 3ª harmônica possuir um valor de resistência muito baixo, onde acaba permitindo a passagem de correntes indevidas, como a taxa

de DHT_i é calculado em relação à corrente fundamental do sistema, quando o valor da corrente sofre uma diminuição, a tendência é que a DHT se eleve. Para isso, aumentou-se valor da resistência do filtro da primeira derivação, de um valor de 0,717004 Ohms, para 1,2 Ohms. Isso interfere no valor do fator de qualidade, alterando também a banda passante, valor que delimita a passagem de determinadas faixas de frequências pelo filtro.

Tendo como resultado, a diminuição do valor de DHT durante o primeiro processo de filtragem, visto na Figura 34 abaixo:

Figura 34 - Níveis de distorção harmônica no inversor de 3 kW com 75% de potência

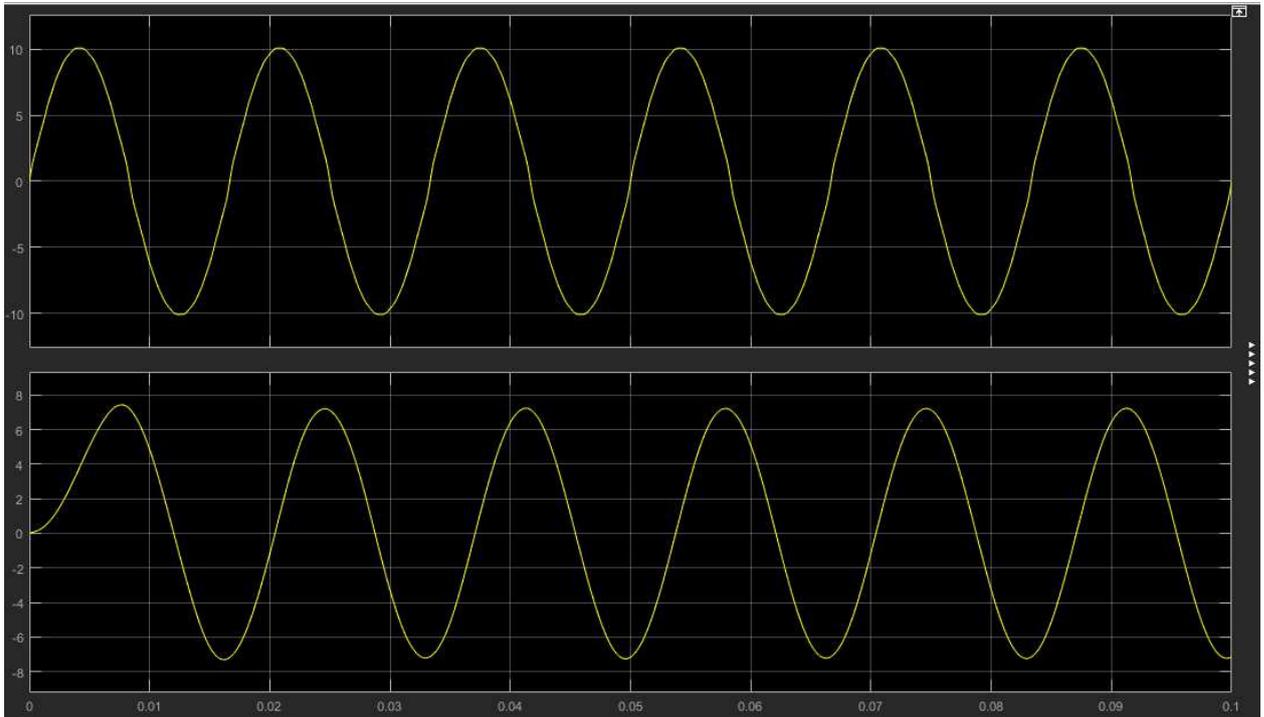


Fonte: Autoria própria (2021).

Com o aumento da resistência, houve uma perda menor da corrente fundamental do sistema e como seu valor é inversamente proporcional à DHT, o valor da distorção harmônica total foi reduzido para valores mais coerentes.

Porém a inserção dos filtros no sistema causa algumas vantagens e desvantagens. Como vantagens têm-se a correção do fator de potência para valores maiores e diminuição das distorções harmônicas. Contudo, ele diminui o valor máximo da corrente e tensão. Além disso, o sinal de saída após o filtro tem um tempo de subida maior, uma curva de subida mais suave, com uma concavidade virada pra cima, o inverso do sinal original. Essa situação pode ser observada na Figura 35.

Figura 35 – Forma de onda da corrente de saída sem filtragem e com filtragem completa do inversor de 3 kW com 75% de potência nominal



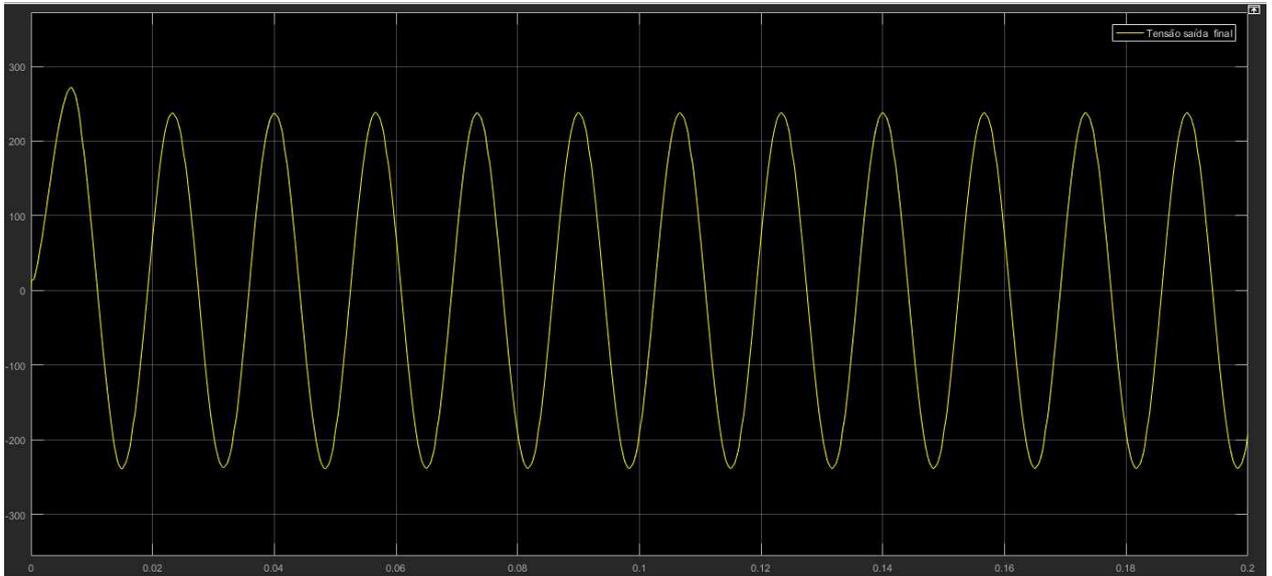
Fonte: Autoria própria (2021).

Além disso possui um pequeno atraso da forma de onda da corrente final. Tal fato se deve a presença de capacitores no sistema. Um dos fatores é o tempo de carregamento dos capacitores, pois na simulação sua tensão inicial é de 0 V, sendo observado que após esse tempo de carregamento, a forma de onda se torna estável. Sendo necessário um tempo igual a cinco vezes a constante de tempo ($5 \cdot T$) para ocorrer o carregamento completo do capacitor. A fórmula da corrente no capacitor é dada pela expressão abaixo. Sendo a parte exponencial também conhecida como atraso de transporte. Conforme a expressão (17) abaixo.

$$I(t) = I * e^{-\frac{t}{T}} \quad (17)$$

A Figura 36 mostra a forma de onda da tensão na carga, tendo seu valor médio entre 230 V, com um pequeno *overshoot* inicial, com oscilações sustentadas e pouca interferência de distorções harmônicas.

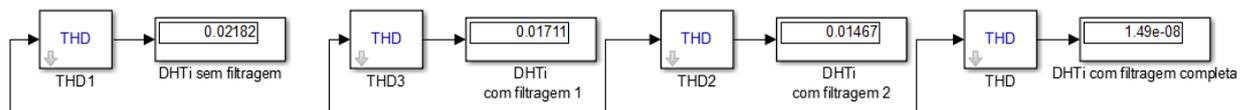
Figura 36 – Forma de onda da tensão de saída na carga do inversor de 3 kW com 75% de potência nominal



Fonte: Autoria própria (2021).

Quando o inversor de 3 kW, opera com 75% da potência nominal, os valores de DHT é disponível na Figura 37.

Figura 37 - Níveis de distorção harmônica no inversor de 3 kW com 75% de potência

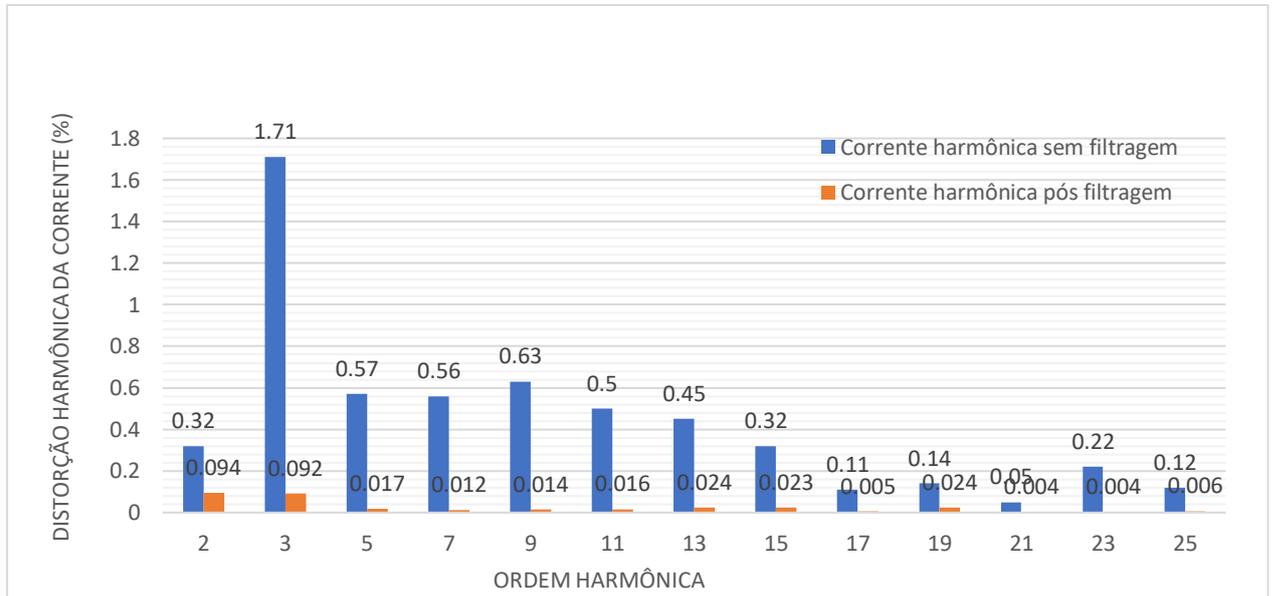


Fonte: Autoria própria (2021).

Houve uma pequena variação dos valores, devido a mudança da resistência, entretanto o valor de DHT final está dentro do limite aceitável por norma (5%). Sendo assim, a alteração da resistência do filtro H3 não trouxe maiores interferências na qualidade da filtragem do sistema.

De modo a comparar a diferença com a utilização do filtro utilizou-se os dados obtidos via simulação, e os dados sem a presença dos filtros. Com isso obteve-se os seguintes dados presentes no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comparação dos níveis de harmônicas no inversor de 3kW com 75% da potência nominal



Fonte: Autoria própria (2021).

Observando-se o gráfico acima é perceptível a grande diminuição da harmônica de 3ª ordem se tornando menos influente na corrente de saída do inversor fotovoltaico. Lembrando que quanto menor a ordem harmônica, maior é a influência no sinal de saída.

4.2 PROJETO DO FILTRO DO INVERSOR DE 20 kW

Para realizar-se a simulação do inversor de 20 kW, utilizou-se conceitos vistos no inversor de 3 kW, alterando os valores das correntes harmônicas, assim como sua frequência para a formação do sinal de saída do inversor, com os dados fornecidos por Fortes (2016). Para o cálculo dos filtros sintonizados do tipo RLC série, conectados em derivação foram feitas as seguintes considerações:

Primeiramente foi calculado o ângulo teta (θ) através do valor do fator de potência.

- $\cos \theta = 0,92$
- $\theta = 23,0739180656^\circ$

Com o valor de teta, calcula-se a potência reativa do inversor fotovoltaico.

- $\tan \theta = \frac{Q}{20k}$
- $Q = 8519,96432272 \text{ Var}$

Após calcular o valor da potência reativa, analisa-se o valor da potência reativa que deve ser compensada para a correção para o fator de potência para 0,98.

- $\cos \theta_{co} = 0,98$
- $\theta_{co} = 11,4783^\circ$
- $\tan \theta_{co} = \frac{Q_a}{20k}$
- $Q_a = 4061,17321266 \text{ Var}$

Com isso, o valor da potência reativa do filtro é obtido a partir da diferença da potência reativa antes, e após a correção.

- $Q_{filtro} = Q - Q_a = 4458,79111006 \text{ Var}$
- $Q_{fmono} = \frac{Q_{filtro}}{3} = 1486,26370335 \text{ Var}$
- $Q_{fmonofiltro} = \frac{Q_{fmono}}{3} = 495,2637 \text{ Var}$

Observou-se nas simulações anteriores que com uma grande quantidade de filtros sintonizados, a cada etapa de filtragem ocorria uma redução considerável no valor da corrente fornecida para a carga. Com isso, optou-se por filtrar as três harmônicas de maior influência no inversor operando com 20 e 75% de sua potência nominal. Sendo definido as harmônicas de 4^a, 7^a e 11^a ordem.

A partir das expressões (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12) e (13), calculou-se os valores dos parâmetros dos filtros sintonizados no Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 abaixo.

Tabela 10 - Valores do filtro da 4^a harmônica do inversor de 20 kW

Filtro 4^a harmônica						
Tensão (V_{ef})	eficaz	Potência reativa filtro (Q_{filtro})	Ordem harmônica (h)	Fator de qualidade (Q)	de	Frequência da rede (f)
155,5635 V		495,2637 VAR	4	35		60 Hz

Reatância do filtro (Xeff)	do	Reatância capacitiva (Xc)	Reatância indutiva (XI)
48,86286 Ohms		52,12038 Ohms	3,257523887 Ohms
Capacitância (C)	Indutância (L)	Resistência (R)	
5,09E-05 F	0,00864085 H	0,372288444 Ohms	

Fonte: Autoria própria (2021).

Para o filtro de 4ª harmônica foi definido um fator de qualidade de 35, e foram obtidos os valores de R, L e C presentes no Tabela 10.

Tabela 11 - Valores do filtro de 7ª ordem do inversor de 20 kW

Filtro de 7ª ordem						
Tensão eficaz (Vef)	Potência reativa filtro (Qfiltro)	Ordem harmônica (h)	Fator de qualidade (Q)	Frequência da rede (f)		
155,5635 V	495,2637 VAR	7	35	60 Hz		
Reatância do filtro (Xeff)	do	Reatância capacitiva (Xc)	Reatância indutiva (XI)			
48,86286 Ohms		49,88083 Ohms	1,017976215 Ohms			
Capacitância (C)	Indutância (L)	Resistência (R)				
5,32E-05 F	0,002700266 H	0,203595243 Ohms				

Fonte: Autoria própria (2021).

Os valores dos parâmetros do filtro de 7ª harmônica podem ser visualizados no Tabela 11, com fator de qualidade de 35, frequência da rede de 60 Hz, entre outras informações disponíveis.

Tabela 12 - Valores do filtro de 11ª ordem do inversor de 20 kW

Filtro da 11ª harmônica						
Tensão eficaz (Vef)	Potência reativa filtro (Qfiltro)	Ordem harmônica (h)	Fator de qualidade (Q)	Frequência da rede (f)		
155,5635 V	495,2637 VAR	11	35	60 Hz		
Reatância do filtro (Xeff)	do	Reatância capacitiva (Xc)	Reatância indutiva (XI)			

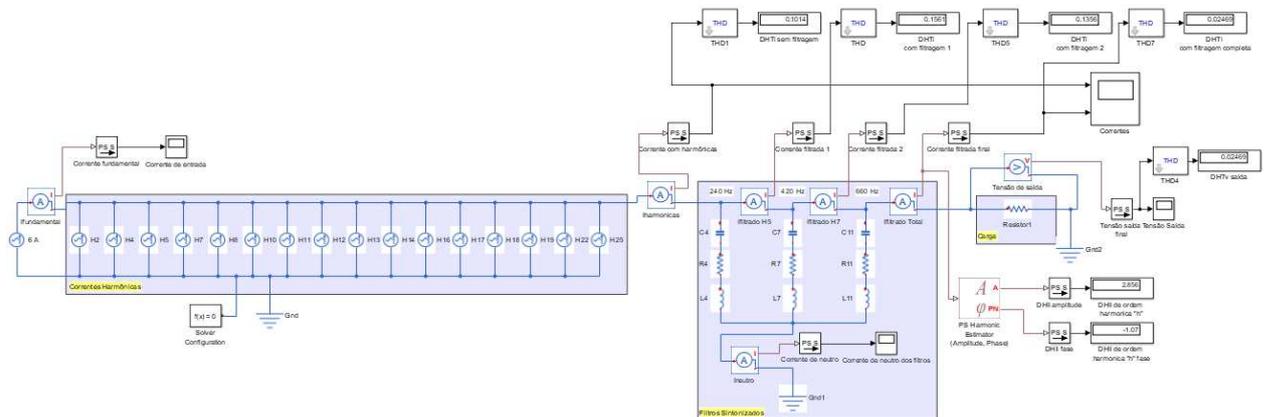
48,86286 Ohms	49,27005 Ohms	0,407190486 Ohms
Capacitância (C)	Indutância (L)	Resistância (R)
5,38E-05 F	0,001080106 H	0,127974153 Ohms

Fonte: Autoria própria (2021).

E para o filtro de 11ª ordem foram calculados os valores de R, L e C, de acordo com o Tabela 12.

Com os filtros já determinados, tem como resultado o diagrama do circuito simulado do inversor de 20 kW operando com 20% da potência nominal na Figura 38.

Figura 38 - Simulação do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal

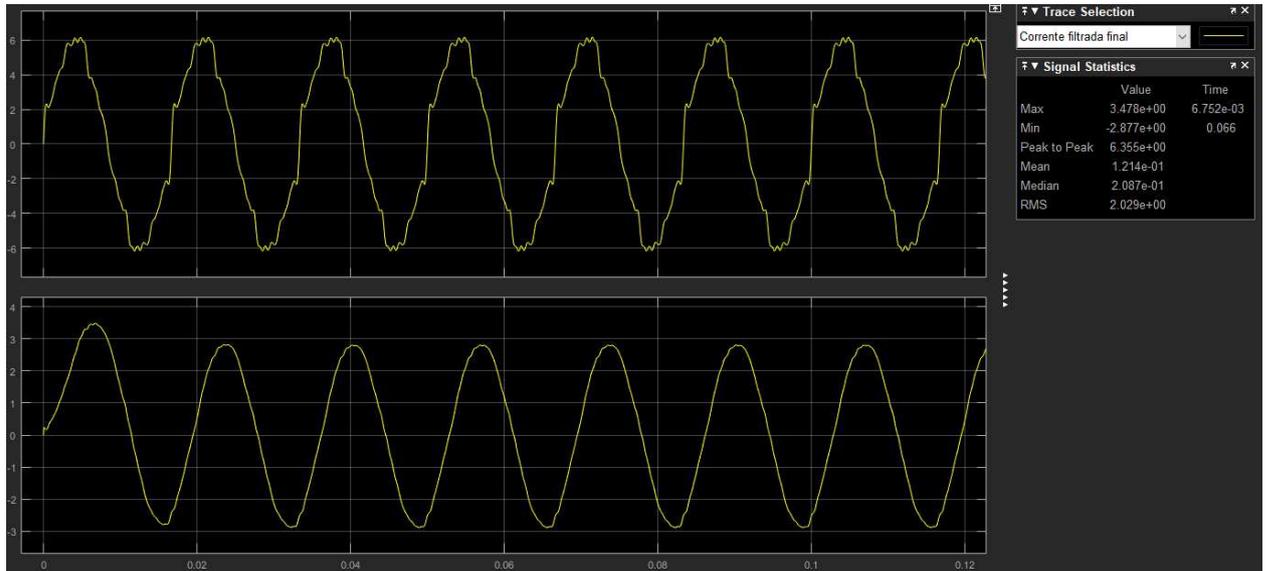


Fonte: Autoria própria (2021).

Utilizando os dados disponíveis em Fortes (2016), necessários para a determinação dos valores das amplitudes e frequências das fontes de correntes, onde simulam a corrente de saída do inversor. O valor adotado para a resistência da carga é de 50 Ohms.

A forma de onda da corrente sem filtro, e após a filtragem é observada na Figura 39.

Figura 39 - Comparação da corrente sem filtragem e com filtragem completa do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal

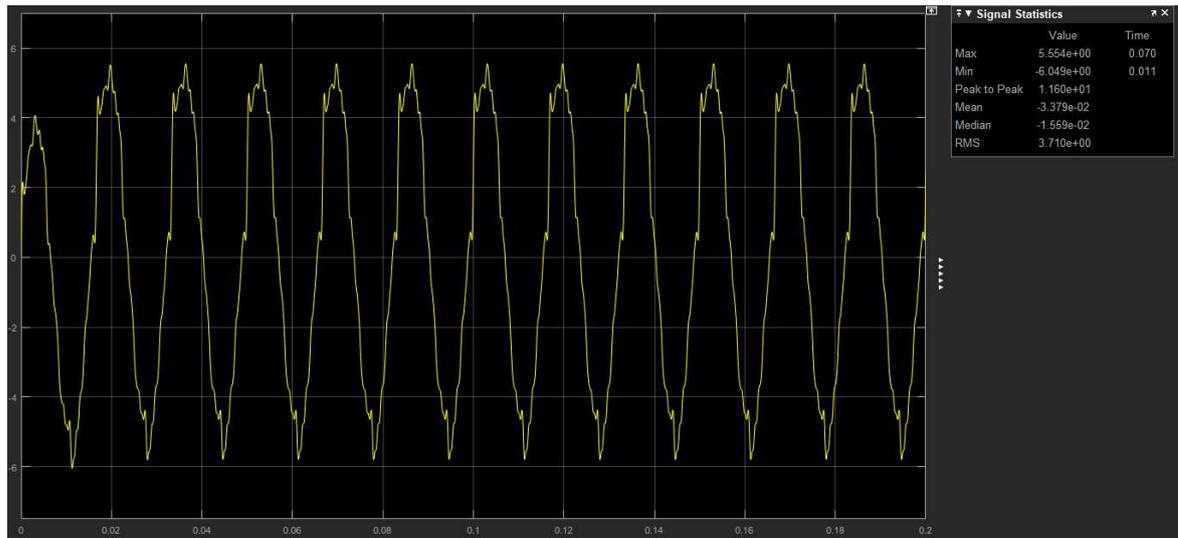


Fonte: Autoria própria (2021).

A forma de onda superior é sem nenhuma filtragem, sendo perceptível grande influência das correntes harmônicas, ocasionando a distorção em toda sua forma de onda. Após o processo de filtragem, no gráfico inferior, houve um sinal quase perfeito, com grande diminuição das distorções harmônicas, porém em consequência, a diminuição do valor de pico da corrente, e uma pequena defasagem de fase, ocasionada devido à presença dos capacitores.

Na Figura 40, observa-se a forma de onda da corrente que percorre no ponto em comum do aterramento dos filtros, para isso inseriu-se um amperímetro para verificar as correntes harmônicas que foram retiradas do circuito durante o processo de filtragem.

Figura 40 - Corrente de neutro dos filtros do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal

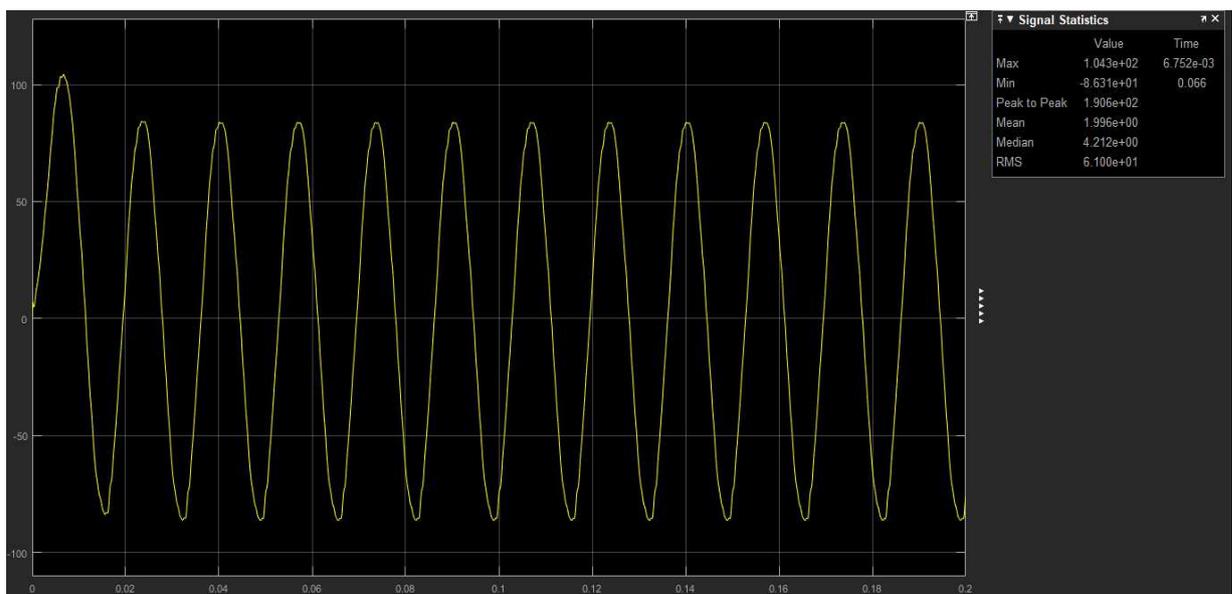


Fonte: Autoria própria (2021).

A corrente de neutro foi analisada no ponto em comum dos filtros em direção ao aterramento. Possui uma grande distorção em sua forma de onda, e representa a corrente filtrada do sistema principal. Reduzindo assim, a distorção harmônica da rede.

Analisando a tensão na carga, pode-se observar na Figura 41 sua forma de onda.

Figura 41 - Forma de onda da tensão de saída na carga do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal

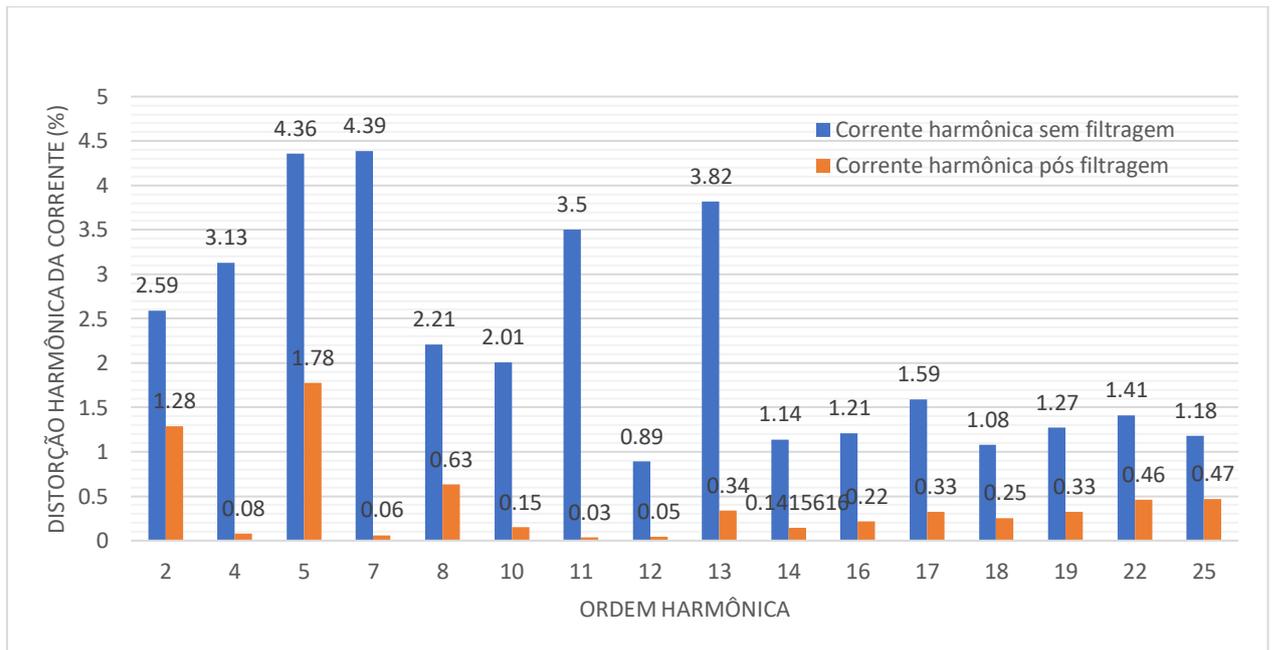


Fonte: Autoria própria (2021).

A tensão de saída analisada na carga, possui um *overshoot* inicial e em regime permanente possui oscilações sustentadas, sendo que na parte negativa, possui uma pequena distorção, com uma DHT de aproximadamente 2,5%.

De modo a avaliar o desempenho dos filtros sintonizados na saída do inversor de 20 kW operando com 20% de sua potência nominal, foi elaborado o Gráfico 3.

Gráfico 3 - Comparação das correntes harmônicas antes e após o processo de filtragem do inversor de 20 kW com 20% da potência nominal



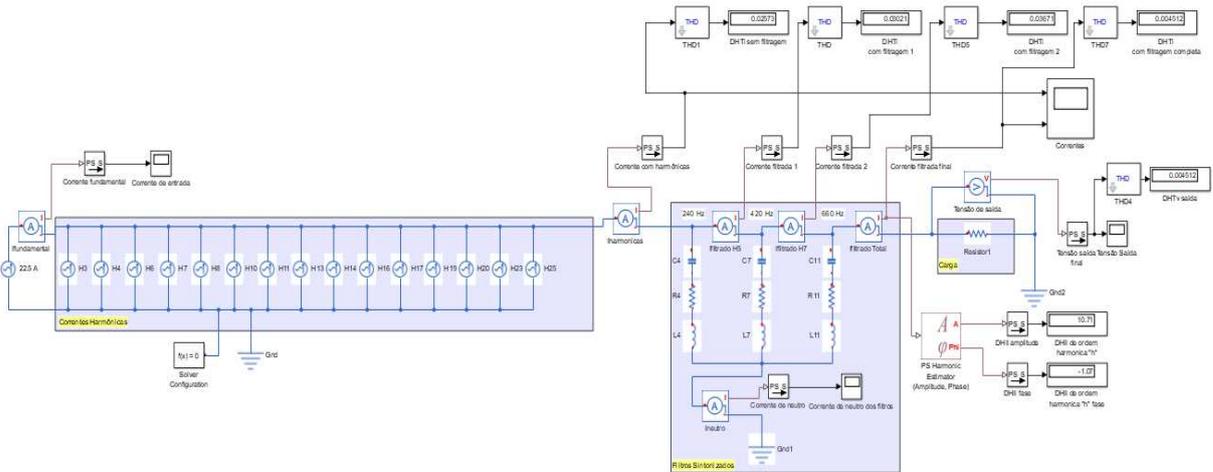
Fonte: Autoria própria (2021).

O Gráfico 3 apresenta uma comparação entre os valores em porcentagem das correntes harmônicas, sem a presença dos filtros e após o processo de filtragem, de modo a ilustrar a eficiência dos filtros projetados.

4.2.1 Inversor de 20 kW (75% da potência nominal)

Na Figura 42, simulou-se o inversor com 75% de sua potência nominal, sendo necessário alterar os valores das fontes de corrente de acordo com o novo cenário, para isso utilizou-se os dados fornecidos por Fortes (2016). Os filtros sintonizados foram permanecidos com os mesmos valores com o intuito de avaliar seu desempenho com a alteração das correntes de entrada.

Figura 42 - Simulação do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal

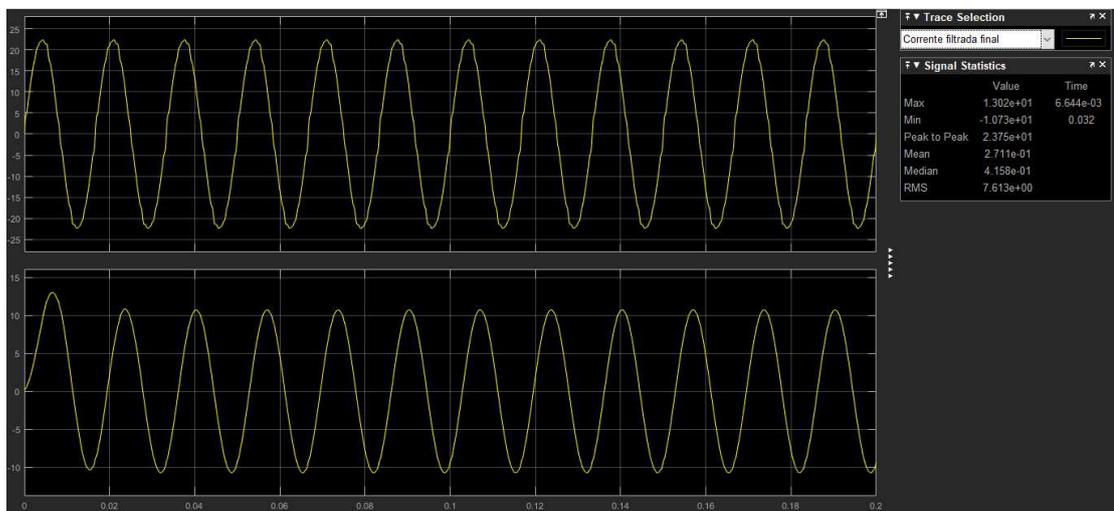


Fonte: Autoria própria (2021).

À medida que se aumenta a potência nominal do inversor, os valores das ordens harmônicas reduziram consideravelmente e após a passagem da corrente pelos filtros sintonizados a corrente de saída possui um pequeno *overshoot* inicial, porém reduz quase totalmente as distorções harmônicas. Entretanto diminui o valor máximo e médio da corrente.

Na Figura 43, observa-se a comparação da forma de onda da corrente sem a presença de filtros e após percorrer todos os filtros sintonizados dimensionados anteriormente.

Figura 43 - Comparação da corrente antes e após o processo de filtragem do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal

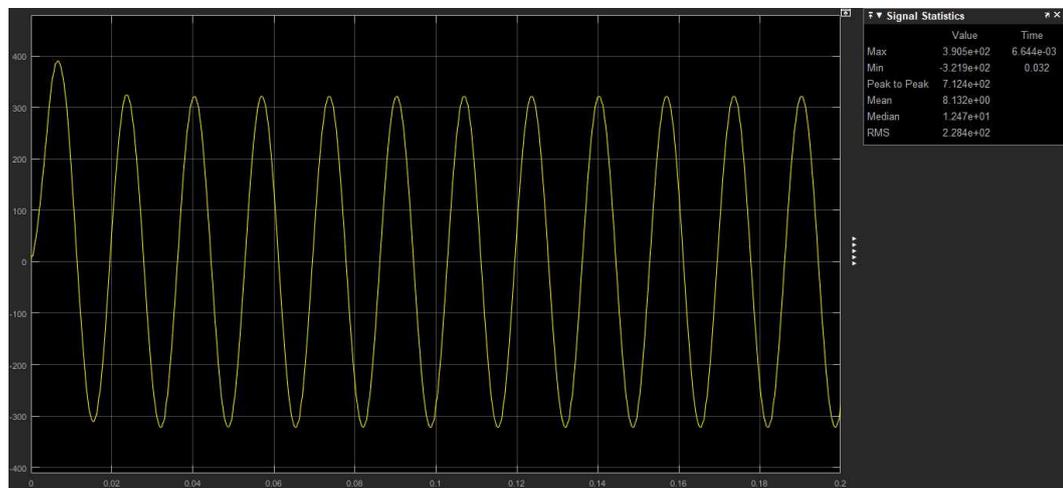


Fonte: Autoria própria (2021).

Devido o processo de filtragem ocorreu um pequeno *overshoot* de corrente durante o primeiro ciclo, se estabilizando posteriormente. Houve uma diminuição da corrente máxima pois a presença dos filtros acaba permitindo a passagem de correntes indesejáveis, melhorando o sinal de saída, porém tendo algumas alterações nos valores de amplitude.

Na Figura 44 é apresentado a forma de onda da tensão de saída analisada na carga.

Figura 44 - Forma de onda da tensão de saída do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal

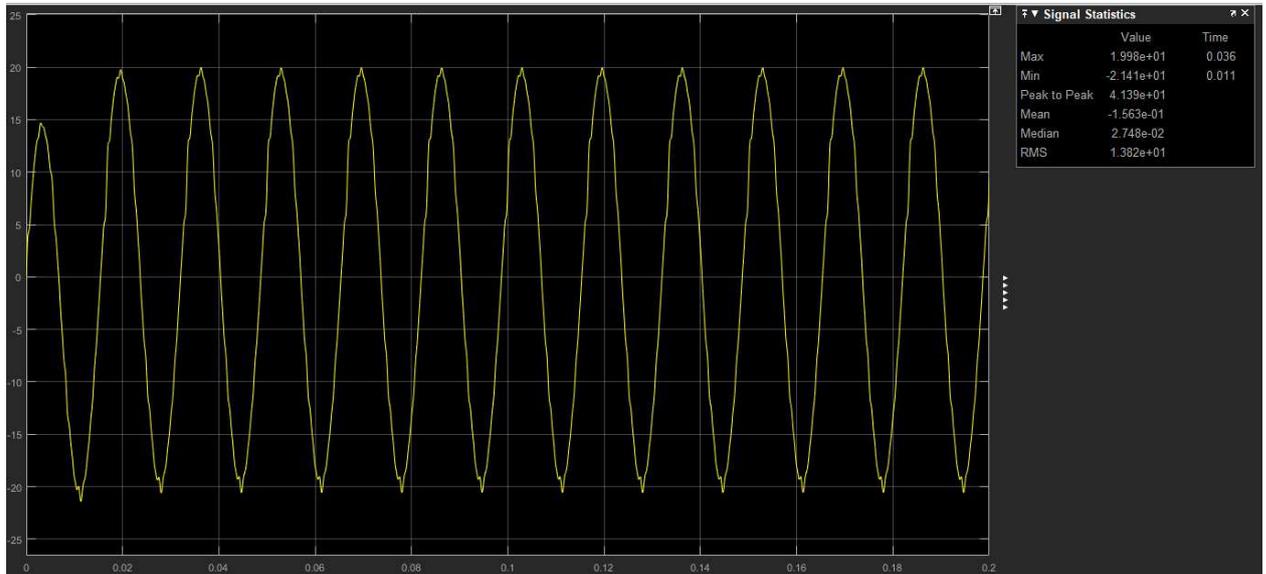


Fonte: Autoria própria (2021).

A tensão de saída observada na carga possui um *overshoot* inicial e oscilações senoidais sustentadas com baixa taxa de distorção harmônica. Tendo um valor de tensão médio em torno de 310 V.

A corrente de neutro dos filtros é apresentada na Figura 45, sendo inserido um amperímetro no ponto em comum dos filtros em direção ao aterramento.

Figura 45 - Forma de onda da corrente de neutro dos filtros do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal

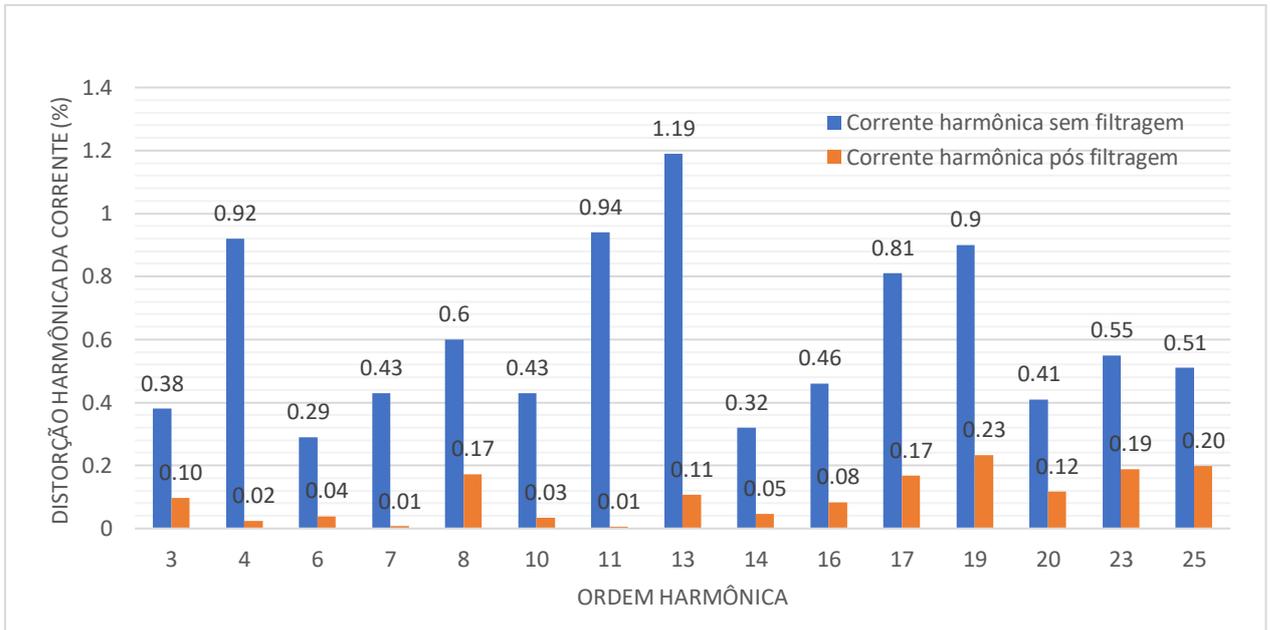


Fonte: Autoria própria (2021).

A corrente de neutro dos filtros sintonizados não são tão altas pois os níveis das ordens harmônicas são baixos. Tendo uma pequena distorção harmônica visível em sua forma de onda, onde a primeira oscilação possui amplitude inferior as demais.

Com os dados obtidos, foi-se elaborado o Gráfico 4, comparando os valores das correntes harmônicas referentes ao inversor de 20 kW operando com 75% da potência nominal.

Gráfico 4 - Comparação das correntes harmônicas antes e após o processo de filtragem do inversor de 20 kW com 75% da potência nominal



Fonte: Autoria própria (2021).

Os valores dados em porcentagem em relação à corrente fundamental mostram em azul as harmônicas sem a presença dos filtros e em laranja após a filtragem do sinal de saída do inversor.

Com os dados fornecidos por Fortes (2016), montou-se o Quadro 2, com as informações dos inversores antes da implementação dos filtros sintonizados para a análise dos índices de distorção harmônica.

Quadro 2 - Classificação das ordens harmônicas dos inversores de 3 kW e 20 kW sem filtragem

Critério	Limite	Ordem	Inversor 3 kW-20 %	Inversor 3 kW-75 %	Inversor 20 kW-20 %	Inversor 20 kW-75 %
Distorção harmônica total	< 5,0%	---	8,40%	1,30%	10,60%	2,70%
Harmônicos ímpares – 3° a 9°	< 4,0%	3°	6,20%	1,71%	0,37%	0,38%
		5°	3,24%	0,57%	4,36%	0,22%
		7°	2,20%	0,56%	4,39%	0,43%
		9°	1,77%	0,63%	0,55%	0,12%
Harmônicos ímpares – 11° a 15°	< 2,0%	11°	1,61%	0,50%	3,50%	0,94%
		13°	1,45%	0,45%	3,82%	1,19%
		15°	1,24%	0,32%	0,28%	0,18%
	< 1,5%	17°	1,28%	0,11%	1,59%	0,81%
		19°	1,16%	0,14%	1,27%	0,90%

Harmônicos ímpares – 17° a 21°		21°	1,13%	0,05%	0,49%	0,07%
Harmônicos ímpares – 23° a 33°	< 0,6%	23°	0,90%	0,22%	0,54%	0,55%
		25°	0,84%	0,12%	1,18%	0,51%
Harmônicos pares – 2° a 8°	< 1,0%	2°	---	0,32%	2,59%	0,28%
		4°	---	---	3,13%	0,92%
		6°	---	---	0,43%	0,29%
		8°	---	---	2,21%	0,60%
Harmônicos pares – 10° a 32°	< 0,8%	10°	---	---	2,01%	0,43%
		12°	---	---	0,89%	0,23%
		14°	---	---	1,14%	0,32%
		16°	---	---	1,21%	0,46%
		18°	---	---	1,08%	0,20%
		20°	---	---	0,14%	0,41%

Fonte: Autoria própria (2021).

Sem a utilização de nenhum filtro sintonizado nas condições onde os inversores operavam com 20% de suas potências nominais, várias ordens harmônicas estavam acima dos valores aceitáveis por norma, principalmente no inversor de 20 kW com 14 índices destacados, e para o inversor de 3 kW possui 3 índices com valores irregulares.

De modo a averiguar se os valores das ordens harmônicas após o processo de filtragem estão dentro dos limites admissíveis por norma, disponível na Tabela 2, realizou-se o Quadro 3, classificando as correntes harmônicas de acordo com o tipo de inversor, e com a variação de sua potência nominal.

Quadro 3 - Classificação das ordens harmônicas dos inversores de 3 kW e 20 kW após filtragem

Critério	Limite	Ordem	Inversor 3 kW- 20 %	Inversor 3 kW- 75 %	Inversor 20 kW- 20 %	Inversor 20 kW- 75 %
Distorção harmônica total	< 5,0%	---	0,01900%	0,01867%	2,46900%	0,45120%
Harmônicos ímpares – 3° a 9°	< 4,0%	3°	0,19839%	0,09196%	---	0,00585%
		5°	0,02075%	0,01694%	1,77661%	---
		7°	0,19839%	1,20730%	0,06099%	0,10775%
		9°	0,05051%	0,01387%	---	---
Harmônicos ímpares – 11° a 15°	< 2,0%	11°	0,06376%	0,01592%	0,03334%	0,09729%
		13°	0,06449%	0,02398%	0,34023%	0,00688%
		15°	0,06459%	0,02324%	---	---
	< 1,5%	17°	0,07882%	0,00488%	0,32777%	0,16844%
		19°	0,07440%	0,02357%	0,32661%	0,23212%

Harmônicos ímpares – 17° a 21°		21°	0,07357%	0,00426%	---	---
Harmônicos ímpares – 23° a 33°	< 0,6%	23°	0,04441%	0,00413%	---	0,18842%
		25°	0,04370%	0,00642%	0,46674%	0,19851%
Harmônicos pares – 2° a 8°	< 1,0%	2°	---	0,09000%	1,28466%	---
		4°	---	---	0,08137%	0,02384%
		6°	---	---	---	0,03873%
		8°	---	---	0,63095%	0,17255%
Harmônicos pares – 10° a 32°	< 0,8%	10°	---	---	0,14884%	0,03325%
		12°	---	---	0,04569%	---
		14°	---	---	0,14156%	0,04683%
		16°	---	---	0,21642%	0,08308%
		18°	---	---	0,25326%	---
		20°	---	---	0,46072%	0,11727%

Fonte: Autoria própria (2021).

Para isso utilizou-se os dados obtidos via simulação dos inversores de 3 kW e 20 kW, sendo considerado os cenários com 20% e 75% de suas potências nominais. Os valores em preto estão dentro ou abaixo do limite, já os valores em vermelho estão acima do admissível, estão organizados de acordo com sua ordem harmônica, classificados de acordo com a norma. Após a análise, nota-se um valor de 1,28% na corrente harmônica par de segunda ordem, estando 0,28% acima do permitido. Vale ressaltar que devido a potência do inversor ser elevada e operando com baixa potência de geração o controle das harmônicas se torna mais complexa e geralmente assume baixa potência no nascer e pôr do sol, em períodos muito nublados com baixa irradiância solar, ou em sistemas mal feitos, onde ocorre o sombreamento dos painéis por fatores externos e contínuos.

5 CONCLUSÃO

Após as devidas análises foi possível constatar que durante períodos onde ocorrem baixas incidências solares, seja por sombreamento de nuvens, edifícios, árvores, sujeira, entre outros fatores, há presença considerável de correntes harmônicas, principalmente em inversores de maior potência.

Apresentou-se as formas de ondas da tensão e corrente dos inversores através de simulação computacional, e constatou-se a redução dos componentes harmônicos com a implementação dos filtros sintonizados.

Nas duas primeiras análises dos inversores de 3 kW e 20 kW operando com 20% da potência nominal sem a presença de filtros, foram observadas diversas harmônicas que estavam acima do limite definido pela norma. Entretanto, com o aumento da potência operativa do inversor esse valor diminuiu consideravelmente.

Uma desvantagem observada com a presença dos filtros sintonizados, é a redução da corrente média do sinal de saída, isso se deve ao processo de filtragem do sistema. Tendo em vista o baixo custo de implementação devido aos elementos passivos utilizados, se torna acessível e uma boa opção da inserção do mesmo. Comparado aos outros tipos de métodos de redução de harmônicos.

Os eventos com os piores níveis de harmônicas observados são em casos em que há baixa incidência solar sobre os painéis fotovoltaicos. Isso ocorre, pois as placas solares fornecem baixa corrente e tensão para o inversor, nesses casos, para minimizar esse efeito, pode-se instalar filtros sintonizados conectados após o inversor. Neste estudo, foi implementada essa solução por meio do *software simulink*. Os resultados encontrados neste trabalho de conclusão de curso indicam que este artifício implica em uma redução significativa dos valores das distorções harmônicas presentes na corrente de saída do sistema.

Por fim, com o aumento contínuo desse tipo de geração distribuída, aumentam-se os cuidados em relação à qualidade de energia de toda a rede elétrica. Tendo em vista que todo o excedente de geração é enviado para a rede da concessionária, podendo em grande escala, impactar negativamente o sistema de distribuição de energia.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização de filtros ativos para melhor controle das correntes harmônicas geradas devido ao uso de inversores fotovoltaicos;
- Comparação de eficiência de filtros ativos e passivos em sistemas fotovoltaicos;
- Análise da variação da incidência solar pontual na geração de harmônicos em sistemas fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL e ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR - ABSOLAR. **Energia fotovoltaica no Brasil: Infográfico ABSOLAR**. ANEEL e ABSOLAR, 2020. Disponível em: <<http://www.brainmarket.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Infográfico-Absolar-1.pdf>>. Acesso em: 02 out. de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8, qualidade da energia elétrica**. Brasília: ANEEL, 2020b. Revisão 11. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo8_Revisão_11/d1f58668-ab9f-5e0a-e171-5394351ef374>. Acessado em: 5 out 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. ANEEL, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 12 set. de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Sistemas de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. ANEEL, 2020a. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 30 set. de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída: Informações compiladas e mapa**. ANEEL, 2020c. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y9r6jeg5>>. Acesso em: 01 out. de 2020.

ATHOS ELETRONICS. **Inversor Solar – O que é e como funciona**. 2020. Disponível em: <<https://athoselectronics.com/inversor-solar-o-que-e/#:~:text=O%20inversor%20funciona%20com%20uma,se%20filtros%20indutivos%20e%20capacitivos>>. Acesso em: 10 set. de 2020.

Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) - LABREN / CCST / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos;

GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Sílvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: 2017. 1 Atlas. 88p.

BALEKI, Paulo; Citação Epígrafe. 2005. Disponível em: <https://www.pensador.com/frase/MTY0MzAw/>>. Acesso em 05 set. 2021.

BARATA, H. A., SOUZA, V. C., OLIVEIRA, W. D., VIEIRA, J. P. A. **Impacto de redes de distribuição ativas com massiva conexão de geradores fotovoltaicos na estabilidade de tensão de longo prazo em sistemas de potência**. BARATA et al. 21 a 25 de maio de 2017. ERIAC ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, XVII., 2017, Ciudad del Este, Paraguay Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/325343831_IMPACTO_DE_REDES_DE_DISTRIBUICAO_ATIVAS_COM_MASSIVA_CONEXAO_DE_GERADORES_FOTOVOLTAICOS_NA_ESTABILIDADE_DE_TENSAO_DE_LONGO_PRAZO_EM_SISTEMAS_DE_POTENCIA>. Acesso em: 25 set. 2020.

CASTRO, Felipe de Carvalho. **Distorção Harmônica de Corrente Produzida por Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede** / - 2019. 128 f.: il. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, 2019. Disponível em:< <https://tinyurl.com/y43hftwk>>. Acesso em: 28 out. 2020.

DANTAS, Ozlean De Lima. APOLONIO, Roberto. **Impactos da alta penetração fotovoltaica na rede elétrica em relação à qualidade de energia**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 07, Vol. 11, pp. 166-177. Julho de 2019. ISSN: 2448-0959

DECKMANN, S. M. e POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2010. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2020.

DECKMANN, S. M. e POMILIO, J. A. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. 2009. LCEE – DSCE – FEEC – UNICAMP. Disponível em: <

<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/it741/cap7.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2020.

ENGELÉTRICA SERVIÇOS ELÉTRICOS. Manutenção de correção do fator de potência: Cargas não lineares. ENGELÉTRICA, 2011. Disponível em: <<http://www.engeletrica.com.br/manual-Cargas-não-Lineares.html>>. Acesso em: 15 nov. 2021.

FORTES, Rárison Roberto Acácio. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída em condição de ressonância paralela**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/138262/fortes_rra_me_ilha.pdf?sequence=3>. Acesso em: 4 out. de 2020.

FORTES, Rárison Roberto Acácio. **Propagação de harmônicas produzidas por inversores fotovoltaicos e transformadores assimetricamente magnetizados na geração distribuída**. 2018. 203 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180210/fortes_rra_dr_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 2 out. de 2020.

FREITAS, Silene Maria. FREDO, Carlos Eduardo. **Fontes energéticas e protocolo de Kyoto: a posição do Brasil**. Maio de 2005. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/OUT/publicacoes/pdf/seto3-0505.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2020.

IRENA, **Renewables 2019: Market analysis and forecast from 2019 to 2024**. [S.l.], out. de 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2019>>. Acesso em: 24 set. 2020.

JÚNIOR, Alcy Monteiro, GONZÁLEZ, Manuel Lozada, SILVA, Márcio Melquíades e SILVA, Selênio Rocha. **Simulação computacional de distorções harmônicas geradas por inversores em usinas fotovoltaicas no Matlab/Simulink**. JÚNIOR et

al., 2014. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/61420713-Simulacao-computacional-de-distorcoes-harmonicas-geradas-por-inversores-em-usinas-fotovoltaicas-no-matlab-simulink.html>>. Acesso em: 18 set. de 2020.

KOMATSU, Wilson e JÚNIOR, Lourenço Matakas. **PEA-2488 Eletrônica de Potência II - Notas de aula de Inversores**. 2011. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589063/mod_resource/content/1/Apostila_de_inversores_v09062011.pdf>. Acesso em: 15 set. de 2020.

MARTINS, Ronilde. **Análise de Qualidade de Energia Elétrica – QEE**. [S. l.], 6 dez. 2018. Disponível em: <https://daudt.eng.br/pt/mercado/qualidade-energia-eletrica/#:~:text=O%20objetivo%20da%20análise%20de,útil%20e%20desperdiçar%20energia%20elétrica>. Acesso em: 29 set. 2020.

OLIVEIRA, Pedro Andrade de. **Controlador PLL – Phase Locked Loop**. 16 de fev. de 2017. Disponível em: < [https://www.embarcados.com.br/controlador-pll/#:~:text=Phase%20Locked%20Loop%20\(PLL\)%20é,sincronismo%20com%20o%20sinal%20amostrado.&text=Em%20eletrônica%20de%20potência%20tal,elétrica%20\(Grid-Tie\).](https://www.embarcados.com.br/controlador-pll/#:~:text=Phase%20Locked%20Loop%20(PLL)%20é,sincronismo%20com%20o%20sinal%20amostrado.&text=Em%20eletrônica%20de%20potência%20tal,elétrica%20(Grid-Tie).>)>. Acesso em: 14 out. de 2020.

PAPAIIOANNOU, Ioulia T., BOUHOURLAS, Angelos S., MARINOPOULOS, Antonios G., ALEXIADIS, Minas C., DEMOULIAS, Charis S., e LABRIDIS, Dimitris P. **Harmonic impact of small photovoltaic**. 2008.

PEREIRA, Heverton Augusto e PRATES, Mauro de Oliveira. **Aula 13 – Mitigação de Harmônicos**. ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA. 2017. Disponível em:<http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula-13_ELT-428---Mitigação-de-Harmônicos.pdf>. Acesso em: 18 nov. de 2020.

POMILIO, José Antenor. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica: Cap 5 - Conversores CC/CA – inversores**, 1998. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap5.pdf>>. Acesso em: 01 out. de 2020.

ROCHA, Joaquim Eloir, Curitiba. **Apostila de Qualidade de Energia Elétrica**. 2017. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Eletrica%20_%20Apostila.pdf/view>. Acesso em: 15 set. 2020.

SAMPAIO, Leonardo Poltronieri. **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade**. [s.n.], 2013. 209 f. : il. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100342/sampaio_lp_dr_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 6 out. de 2020.

SILVA, Aline Késia Ferreira, VIEIRA, Romênia Gurgel e GUERRA, Maria Isabel da Silva. **Estudo da correção do fator de potência de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. SILVA et al., 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3640/2/Aline%20KFS-MONO.pdf>>. Acesso em: 29 set. de 2020.

TAVARES, Paulo Henrique. **Estudo, projeto e implantação de filtros harmônicos sintonizados para a expansão industrial** / Paulo Henrique Tavares. --Campinas, SP: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/259305/1/Tavares_PauloHenrique_M.pdf>. Acesso em: 18 nov de 2020.