

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Angélica De Marco

ANÁLISE DOS COMPONENTES HARMÔNICOS
PRESENTES NA REDE ELÉTRICA SOB A PRESENÇA
DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E UMA PROPOSTA DE
FILTRO PASSIVO PARA REDUÇÃO DOS HARMÔNICOS

Passo Fundo

2018

Angélica De Marco

ANÁLISE DOS COMPONENTES HARMÔNICOS
PRESENTES NA REDE ELÉTRICA SOB A PRESENÇA
DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E UMA PROPOSTA DE
FILTRO PASSIVO PARA REDUÇÃO DOS HARMÔNICOS

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Sérgio Bordignon.

Passo Fundo

2018

Angélica De Marco

Análise dos Componentes Harmônicos Presentes na Rede Elétrica sob a Presença de Geração Fotovoltaica e uma Proposta de Filtro Passivo para Redução dos Harmônicos

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Me. Sérgio Bordignon.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Me. Sérgio Bordignon - UPF

Prof. Dr. Jocarly Patrocínio De Souza - UPF

Prof. Me. Rodrigo Siqueira Penz - UPF

Este trabalho é dedicado à minha família e à meu namorado, que sempre me incentivaram e me apoiaram nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta instituição de ensino, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

Ao meu orientador Sérgio e ao professor Rodrigo pelo suporte, pelas correções e incentivos.

A equipe do Setor Elétrico da universidade e ao Rangel pela disposição e ajuda nas medições.

Aos meus pais, irmãos, cunhados e namorado, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

Com o crescimento do consumo de energia elétrica, aumentou significativamente a produção da mesma através da geração distribuída por meio das energias renováveis como a energia fotovoltaica. O uso de geração distribuída pode injetar nas redes de distribuição vários distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica que circulam nas mesmas. Este trabalho apresenta uma análise da energia injetada por painéis fotovoltaicos em redes de distribuição de baixa tensão da Universidade de Passo Fundo, com a finalidade de identificar possíveis distúrbios na qualidade de energia elétrica. Como resultado, identificou-se a presença de distorções harmônicas de tensão e corrente. Aprofundando-se na análise percebeu-se que estas distorções harmônicas não eram originadas pela geração fotovoltaica e sim pela característica da carga elétrica ligada à rede de distribuição. Desta forma foi desenvolvido um protótipo de filtro passivo para corrigir este distúrbio. O protótipo foi simulado em software PSIM e posteriormente em bancada de laboratório e os resultados obtidos estão apresentados na conclusão do trabalho.

Palavras-Chave: Qualidade de energia, geração distribuída, filtro passivo, distorção harmônica.

ABSTRACT

With the growth in the consumption of electric energy, significantly increased its production through the generation distributed by means of renewable energies such as photovoltaic energy. The use of distributed generation can inject into the distribution networks several disturbances that affect the quality of the electric energy that circulates in them. This work presents an analysis of the energy injected by photovoltaic panels in low voltage distribution networks of the University of Passo Fundo, in order to identify possible disturbances in the quality of electric energy. As a result, the presence of harmonic distortions of voltage and current was identified. It was observed in the analysis that these harmonic distortions were not caused by photovoltaic generation but by the characteristic of the electric charge connected to the distribution network. In this way a passive filter prototype was developed to correct this disorder. The prototype was simulated in PSIM software and later in laboratory bench and the results obtained are presented at the conclusion of the work.

Keywords: Power Quality, Distributed Generation, Passive Filter, Harmonic Distortion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Efeito fotovoltaico.	17
Figura 2 – Módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.	18
Figura 3 – Componentes de um módulo fotovoltaico.	18
Figura 4 – Curva característica I-V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.	19
Figura 5 – Conjunto de módulos fotovoltaicos.	20
Figura 6 – Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica.	21
Quadro 1 – Características dos inversores <i>Sunway M XS da Saterno</i> .	22
Figura 7 – Composição de uma onda pelo somatório de harmônicas.	26
Quadro 2 – Terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.	26
Quadro 3 – Linha das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	28
Quadro 4 – Limites para os desequilíbrios de tensão.	29
Quadro 5 – Limites para flutuação de tensão.	30
Quadro 6 – Classificação das variações de tensão de curta duração.	31
Quadro 7 – Fatores de ponderação e fator de impacto base, de acordo com a tensão nominal.	32
Figura 8 – Resposta ideal do filtro (a) rejeita-faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-alta; (d) passa-baixa.	33
Figura 9 – Classificação dos filtros ativos de potência.	34
Figura 10 – Topologia dos filtros de saída.	35
Figura 11 – Analisador da Qualidade da Energia.	36
Figura 12 – Parque de Geração Solar da UPF.	38
Figura 13 – Inversor de 12kW.	39
Figura 14 – Inversor de 1,5kW.	39
Figura 15 – Diagrama Unifilar da Subestação de 300kVA.	40
Figura 16 – Analisador de Energia instalado na saída do inversor.	41
Figura 17 – Forma de Onda da Tensão.	41
Figura 18 – Forma de Onda do Fator de Potência.	42
Figura 19 – Forma de Onda da Potência Ativa em kW.	42
Figura 20 – Forma de Onda da Potência Reativa em kVAR.	43
Figura 21 – Forma de Onda da Potência Aparente em kVA.	43
Figura 22 – Forma de Onda da THD da Tensão.	44

Figura 23 – Forma de Onda da THD da Corrente.	44
Figura 24 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de V1.	45
Figura 25 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de V2.	45
Figura 26 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de V3.	45
Figura 27 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de I1.	46
Figura 28 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de I2.	46
Figura 29 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de I3.	47
Figura 30 – Análise das harmônicas na fase R com o inversor conectado no barramento.	48
Figura 31 – Análise das harmônicas na fase S com o inversor conectado no barramento.	48
Figura 32 – Análise das harmônicas na fase T com o inversor conectado no barramento.	49
Figura 33 – Análise das harmônicas na fase R sem o inversor desconectado no barramento.	50
Figura 34 – Análise das harmônicas na fase S sem o inversor desconectado no barramento.	50
Figura 35 – Análise das harmônicas na fase T sem o inversor desconectado no barramento.	51
Figura 36 – Análise das harmônicas na fase R do QGBT do prédio CETEC 1.	52
Figura 37 – Análise das harmônicas na fase S do QGBT do prédio CETEC 1.	52
Figura 38 – Análise das harmônicas na fase T do QGBT do prédio CETEC 1.	53
Figura 39 – Análise das harmônicas na fase R do QGBT do prédio CETEC 2.	54
Figura 40 – Análise das harmônicas na fase S do QGBT do prédio CETEC 2.	54
Figura 41 – Análise das harmônicas na fase T do QGBT do prédio CETEC 2.	55
Figura 42 – Análise das harmônicas na fase R do QGBT do prédio Direito.	56
Figura 43 – Análise das harmônicas na fase S do QGBT do prédio Direito.	56
Figura 44 – Análise das harmônicas na fase T do QGBT do prédio Direito.	57
Figura 45 – Diagrama Unifilar do prédio da Faculdade de Direito.	58
Figura 46 – Circuito RC Série.	59
Figura 47 – Curva característica da tensão de saída de um filtro passa baixa.	59
Quadro 8 – Análise da maior Distorção Harmônica.	61
Figura 48 – Simulação no Software PSIM do circuito do QGBT com o filtro instalado.	62
Figura 49 – Simulação no Software PSIM da entrada e saída da tensão.	63
Figura 50 – Simulação no Software PSIM da distorção harmônica na entrada e na saída da tensão.	63
Figura 51 – Simulação no software PSIM do circuito do QGBT com o segundo filtro	

instalado.	64
Figura 52 – Simulação no Software PSIM da entrada e da saída da tensão.	64
Figura 53 – Simulação no Software PSIM da distorção harmônica na entrada e na saída da tensão.	65
Figura 54 – Simulação em bancada de laboratório.	66
Figura 55 – Simulação no <i>software</i> PSIM do circuito montado na bancada.	67
Figura 56 – Forma de onda da corrente com as distorções harmônicas vista no <i>software</i> PSIM.	67
Figura 57 – Simulação no <i>software</i> PSIM do circuito montado na bancada com o filtro ideal.	68
Figura 58 – Forma de onda da corrente com o filtro ideal vista no <i>software</i> PSIM.	68
Figura 59 – Teste do filtro realizado em bancada de laboratório.	69
Figura 60– Simulação no <i>software</i> PSIM do circuito com filtro.	70
Figura 61 – Forma de onda da corrente encontrada com a utilização do filtro RC série projetado.	70
Figura 62 – Distorção harmônica da corrente sem o uso do filtro.	71
Figura 63– Distorção harmônica da tensão sem o uso do filtro.	71
Figura 64 – Distorção harmônica da corrente com o uso do filtro.	72
Figura 65– Distorção harmônica da tensão com o uso do filtro.	72
Quadro 9– Análise das distorções harmônicas com e sem o uso filtro em (dB).	74

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

CIGRÉ - International Council on Large Electric Systems

INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

IEC – International Electrotechnical Commission

UPF – Universidade de Passo Fundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO.....	13
1.2 OBJETIVO GERAL.....	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	15
2.1.1 Energia Fotovoltaica.....	16
2.1.1.1 <i>Funcionamento</i>	16
2.1.1.2 <i>Módulos fotovoltaicos</i>	17
2.1.1.3 <i>Inversores</i>	21
2.2 QUALIDADE DA ENERGIA	23
2.3 DISTÚRBIOS.....	24
2.3.1 Tensão em regime permanente.....	24
2.3.2 Fator de potência	25
2.3.3 Distorção harmônica	25
2.3.4 Desequilíbrio de tensão	28
2.3.5 Flutuação de tensão	29
2.3.6 Variação de frequência	30
2.3.7 Variação de tensão de curta duração (VTDC).....	30
2.4 FILTROS	32
2.4.1 Filtros Ativos	33
2.4.2 Filtros Passivos.....	34
2.5 ANALISADOR DE ENERGIA	35
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	38

3.1 VISÃO GERAL DO PROJETO.....	38
3.2 ANÁLISE DA ENERGIA.....	40
3.2.1 Análise da energia na saída do inversor	40
3.2.2 Análise da energia no QGBT dos Prédios do Cetec 1, Cetec 2 e Direito	51
3.3 CONSTRUÇÃO DO FILTRO	58
3.3.1 Memorial de Cálculo	59
3.3.2 Cálculo do Filtro	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTVOLTAICA	73
4.2 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
6 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	76
7 REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão mencionadas particularidades sobre a importância da análise e melhoria da qualidade da energia elétrica em redes de distribuição com geração distribuída fotovoltaica, o objetivo geral proposto, listando os objetivos específicos desse trabalho.

1.1 CONTEXTO

O uso da geração distribuída através de energias renováveis como a energia solar fotovoltaica vem crescendo cada vez mais, não só no Brasil, como em todo o mundo. O crescimento da geração distribuída, apesar de ser benéfica aos consumidores, tem injetado nas redes de distribuição existentes vários distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica que circula nas mesmas. A energia fotovoltaica se apresenta como uma fonte alternativa, renovável, viável e promissora para ampliar a geração de eletricidade. A energia do Sol pode ser utilizada para produzir eletricidade pelo efeito fotovoltaico, pela conversão direta da luz solar em energia elétrica, através de placas fotovoltaicas, sendo após processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA, 2014). Um sistema elétrico com excelente qualidade de energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se procedesse de uma fonte de potência infinita. As agências reguladoras de energia elétrica são as responsáveis por definir os indicadores que determinam se o sistema elétrico está funcionando dentro do que é considerado satisfatório em termos de qualidade de energia. Uma das preocupações dos órgãos reguladores é a qualidade da energia, ou seja, a forma de onda, a sua amplitude, as distorções harmônicas e, também, com a qualidade do serviço, ou seja, o número de interrupções de energia e sua duração, um baixo fator de potência também caracteriza uma pobre qualidade da energia da instalação. Uma das soluções para amenizar os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica é a construção de filtros (ROCHA, 2016).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é verificar a qualidade da energia elétrica e a influência de um sistema de geração fotovoltaica, as interferências que ela causará ao ser injetada na rede de distribuição e propor um filtro passivo como solução para redução dos distúrbios.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estudar sobre geração distribuída e o funcionamento da energia fotovoltaica, as influências na regulação de tensão e os distúrbios elétricos, como: distorção de harmônicas, baixo fator de potência, flutuação e desequilíbrio da tensão, variação de tensão de curta duração (VTDC);
- b) Analisar a qualidade da energia, fazer levantamento e avaliação da mesma através de um analisador de energia e de um osciloscópio;
- c) Projetar um filtro que seja capaz de reduzir os distúrbios provocados na rede elétrica através da geração fotovoltaica;
- d) Implementar o filtro projetado na rede elétrica e realizar testes, avaliar o funcionamento e obter resultados.

1.4 JUSTIFICATIVA

O uso de geração distribuída, sobretudo a geração fotovoltaica, tem crescido muito na zona urbana das cidades, sendo sua configuração *on-grid*, ou seja, diretamente conectada na rede de distribuição da concessionária de energia elétrica. O estudo se justifica pela necessidade de conhecermos melhor quais são os efeitos que a geração distribuída causa nas redes de distribuição de energia elétrica, quando a energia gerada excedente é injetada nestas redes e quais as formas de corrigir estes distúrbios.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é entendida pelos setores energéticos mundiais como produção energética próxima ao consumo. No Brasil, a geração distribuída consolida um passo importante em seu desenvolvimento quando é mencionada, na Lei nº 10.848/04, como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento apresentado no Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, fornece características que ajudarão as empresas distribuidoras, que até então se opunham a essa forma de geração, a enxergar na geração distribuída uma forma de atenuar riscos de planejamento. No artigo 14 do Decreto nº 5.163/04 explicita-se como geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de permissionárias, agentes concessionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador. Para o *International Council on Large Electric Systems* (CIGRÉ), a geração distribuída possui potências menores que 50MW e é usualmente conectada à rede de distribuição. É uma forma de geração planejada e despachada de modo descentralizado, sem haver um órgão que comande suas ações. Segundo o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), a geração distribuída é definida como uma forma de geração de energia que ocorre a partir de unidades de geração de pequeno porte conectadas ao sistema de distribuição e próximas ao consumo. Por sua vez, o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) entende que, quando a geração é realizada próxima ao consumidor, é considerada geração distribuída, independentemente de sua potência, tecnologia ou recurso energético utilizado (ZILLES et al., 2012).

A geração distribuída, pressupõe o uso de pequenos sistemas espalhados pelas cidades e cercanias, conectados na rede de distribuição, o que implica especial atenção a aspectos relacionados à qualidade da energia e ao conhecimento do perfil de operação desses sistemas, uma vez que o uso extensivo desta geração nesses termos torna complexa a tarefa de fiscalizar a qualidade e a quantidade de energia entregue por esses sistemas.

Com base no exposto e nos recentes avanços da ciência, é possível constatar que são diversas as opções tecnológicas de geração distribuída, entre elas as tecnologias convencionais (pequenas centrais hidrelétricas) e as tecnologias em crescimento (sistemas fotovoltaicos, aerogeradores e células a combustível).

Conforme disposto na regulamentação, a micro e a minigeração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes

renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW. (ANEEL, Cadernos Temáticos ANEEL Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica 2ª Edição, 2016).

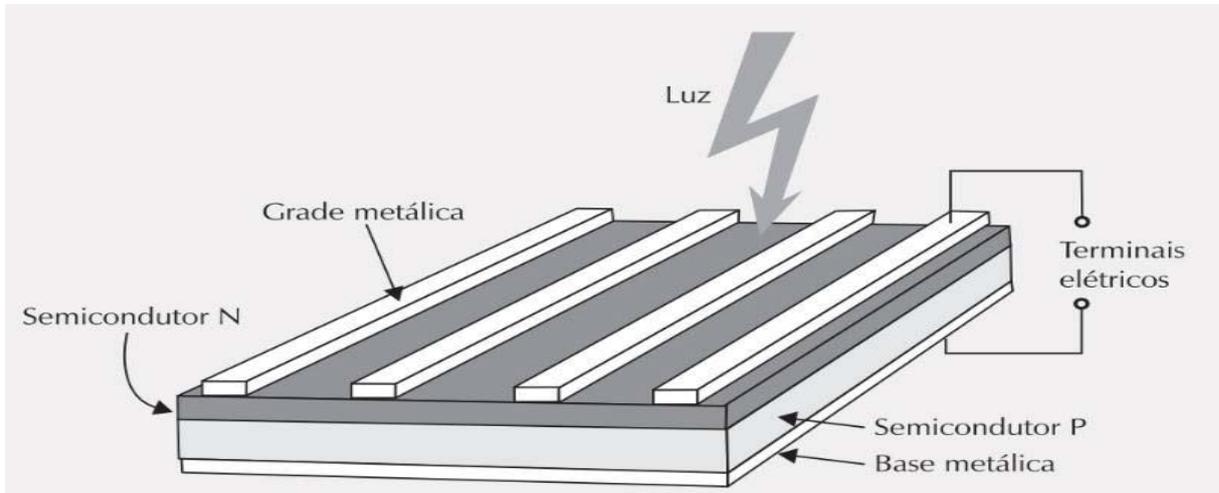
2.1.1 Energia Fotovoltaica

A geração distribuída do tipo fotovoltaica parte do princípio de que cada unidade consumidora é uma unidade de produção elétrica em potencial, capaz de abastecer total ou parcialmente a sua própria demanda e, caso a geração seja superior à demanda, o excedente é injetado na rede. Dessa forma, os sistemas fotovoltaicos contribuem com o setor elétrico injetando energia diretamente na rede de distribuição ou aliviando a demanda de uma determinada unidade de consumo. Uma unidade consumidora é entendida como qualquer edificação que possua demanda por eletricidade: residência, comércio, shopping, prédios públicos, indústria, galpão, universidades etc. Em todos os casos, o critério mínimo para habilitar a unidade consumidora para receber um sistema fotovoltaico é possuir área exposta ao sol (VILLALVA, 2014).

2.1.1.1 Funcionamento

O efeito fotovoltaico, como mostrado na Figura 1, é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consistindo na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um sanduíche de materiais semicondutores. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles. Se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos, surgirá uma corrente elétrica (VILLALVA, 2014).

Figura 1 – Efeito Fotovoltaico



Fonte: (VILLALVA, 2014)

Existem atualmente diversas tecnologias para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As tecnologias de células fotovoltaicas mais comuns encontradas no mercado são a do silício monocristalino, a do silício policristalino e a do filme fino de silício. As células e os módulos de silício mono e policristalino, são os que apresentam as maiores eficiências de conversão, tanto nas experiências em laboratório como nos produtos comercialmente disponíveis (VILLALVA, 2014).

2.1.1.2 Módulos fotovoltaicos

Os termos, módulo, placa ou painel têm o mesmo significado e são usados indistintamente na literatura para descrever um conjunto empacotado de células fotovoltaicas disponível comercialmente (VILLALVA, 2014).

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino normalmente encontrados no mercado produzem entre 5W e 400W de potência, apresentam tensões máximas de até aproximadamente 37V e podem fornecer em torno de 8A de corrente elétrica. A Figura 2 ilustra módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.

Um módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Normalmente as células são conectadas em série, para produzir tensões maiores.

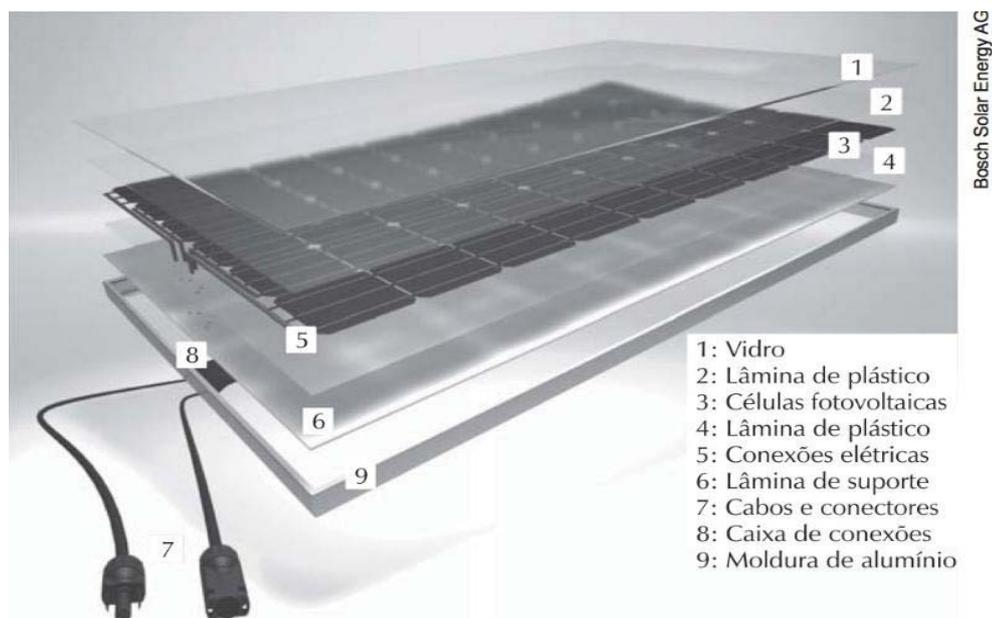
Figura 2 – Módulos fotovoltaicos de silício monocristalino.



Fonte: (VILLALVA, 2014)

A Figura 3 mostra como é fabricado um módulo solar fotovoltaico típico. As células e suas conexões elétricas são prensadas dentro de lâminas plásticas. O módulo é recoberto por uma lâmina de vidro e por último recebe uma moldura de alumínio. Na parte traseira o módulo recebe uma caixa de conexões elétricas, à qual são conectados os cabos elétricos que normalmente são fornecidos junto com o módulo. Os cabos possuem conectores padronizados, que permitem a rápida conexão de módulos em série (VILLALVA, 2014).

Figura 3 – Componentes de um módulo fotovoltaico.



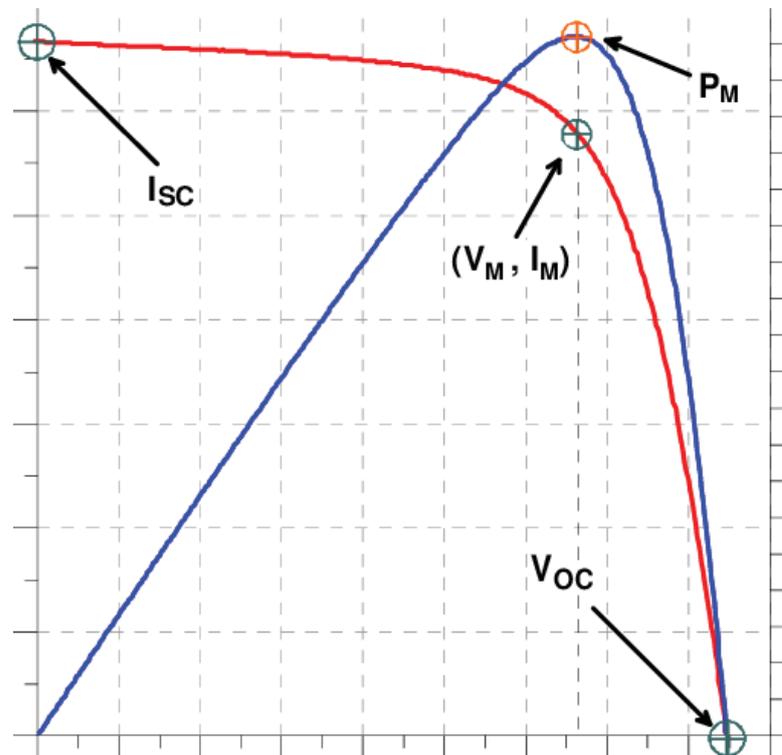
Fonte: (VILLALVA, 2014)

A relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo fotovoltaico é mostrada na curva I – V da Figura 4. Todos os módulos fotovoltaicos possuem uma característica semelhante. Para cada curva I – V existe uma curva P – V correspondente, que mostra como a potência do módulo varia em função de sua tensão, destacando o ponto de corrente de curto-circuito, ponto de máxima potência e ponto de tensão de circuito aberto.

A corrente de curto-circuito (ISC) é aquela que acontece quando colocamos em curto-circuito os terminais do módulo. Nessa situação não existe tensão elétrica e a corrente do módulo alcança o seu valor máximo.

A tensão de circuito aberto (Voc) é aquela que medimos na saída do módulo quando seus terminais estão abertos, ou seja, quando não existe nada ligado a ele. Esta é a máxima tensão que o módulo pode fornecer. Existe um único ponto nas curvas I – V e P – V que corresponde à situação na qual o módulo fornece a potência máxima. Idealmente deve-se operar o módulo nesse ponto, pois nesta situação sua produção de energia é maior.

Figura 4 – Curva característica I-V de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Curva-caracteristica-I-V-e-curva-de-potencia-versus-tensao-P-V-de-um-modulo_fig1_242193599, acesso em 17/09/2018.

A tensão de máxima potência (VM) é o valor da tensão nos terminais do módulo quando fornece sua potência máxima na condição padronizada de teste.

A corrente de máxima potência (IM) é o valor da corrente nos terminais do módulo quando fornece sua potência máxima na condição padronizada de teste.

A potência de pico (PM) é a máxima potência que o módulo pode oferecer na condição padronizada de teste.

A corrente fornecida pelo módulo não se altera com a temperatura. Uma consequência de variação sobre o módulo fotovoltaico é que, quando a temperatura aumenta, a potência fornecida pelo módulo diminui, pois a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo.

Os sistemas fotovoltaicos podem empregar um grande número de módulos conectados em série ou paralelo para produzir a quantidade de energia elétrica desejada. Um agrupamento de módulos é denominado arranjo ou conjunto fotovoltaico, a Figura 5 ilustra um arranjo fotovoltaico conectado à rede elétrica (VILLALVA, 2014).

Figura 5 –Conjunto de módulos fotovoltaicos.



Fonte: (VILLALVA, 2014)

Quando os módulos são conectados em série, a tensão de saída do conjunto corresponde à soma da tensão fornecida por cada um dos módulos. A corrente que circula pelo conjunto é a mesma em todos os módulos.

Quando os módulos são conectados em paralelo, a tensão de saída do conjunto é a mesma tensão fornecida por um módulo individual. Por outro lado, a corrente fornecida pelo conjunto é a soma das correntes dos módulos do conjunto.

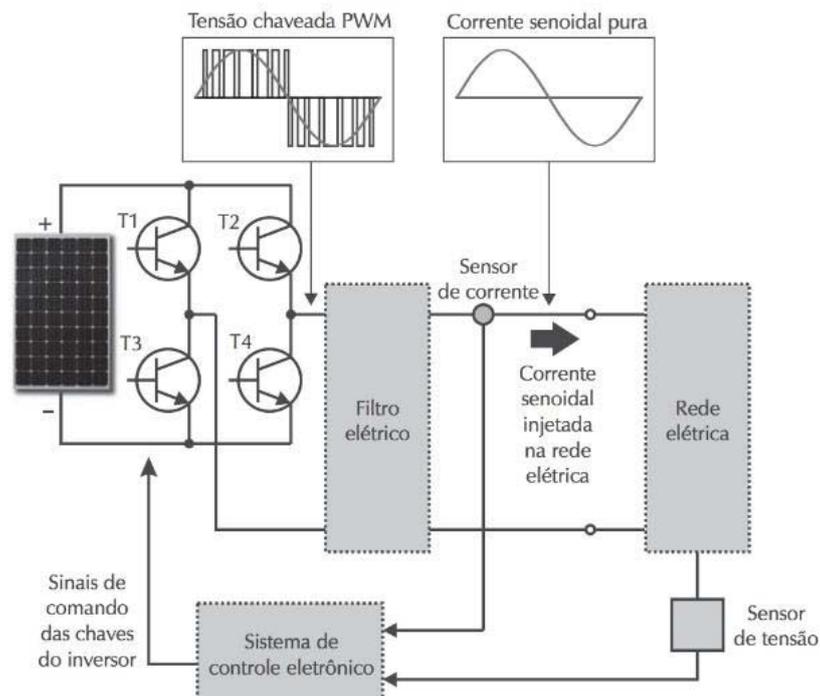
2.1.1.3 Inversores

O inversor, é um equipamento eletrônico que converte a eletricidade de tensão e correntes contínuas (CC) em tensão e corrente alternadas (CA). O inversor é necessário nos sistemas fotovoltaicos para alimentar consumidores em corrente alternada a partir da energia elétrica de corrente contínua produzida pelo painel fotovoltaico. O inversor adequado deve ser escolhido para cada tipo de sistema fotovoltaico em função de seu tamanho e dos demais componentes existentes.

A Figura 6 ilustra o funcionamento de um inversor CC-CA para a conexão à rede elétrica, esse inversor possui um sistema eletrônico de controle que o transforma em uma fonte de corrente. A função desse sistema de controle, entre outras, é fazer com que a corrente nos terminais de saída do inversor, ou seja, a corrente injetada pelo inversor na rede elétrica, tenha o formato senoidal e esteja sincronizada com a tensão senoidal da rede. Estes inversores estão disponíveis em diversas faixas de potência, desde 250W, para a conexão de apenas um módulo, até vários quilowatts (kW), empregados em usinas de energia solar.

O Quadro 1, retirado do catálogo do fabricante *Saterno*, mostra as principais características encontradas nos inversores empregados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, tomando como exemplo a linha de produtos *Sunway M XS*.

Figura 6 – Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica.



Quadro 1 – Características dos inversores *Sunway M XS da Saterno*.

Características do produto			
Faixa de tensão de MPPT	125-480 Vcc	Distorção total da corrente de rede	≤3%
Máx. tensão CC	580 Vcc	Grau de proteção	IP65
Número máx. <i>strings</i> na entrada	4	Faixa de temperatura	-25 °C–+45 °C
Número máximo de canais MPPT independentes	2 (1 no M XS 2200)	Umidade relativa	95% máx.
Tensão de rede	230 Vca +/- 15%	Consumo parado	<10 W
Frequência de rede	60 Hz	Consumo noturno	<0,25 W

Fonte: (VILLALVA, 2014)

A faixa útil de tensão é o intervalo de valores de tensão de entrada no qual o inversor consegue operar. É também a faixa de tensão na qual o sistema de MPPT (rastreamento do ponto de máxima potência) do inversor consegue maximizar a produção de energia dos módulos fotovoltaicos.

A tensão contínua máxima na entrada é o valor máximo absoluto da tensão admissível na entrada do inversor. A tensão máxima suportada pelo inversor está relacionada com a tensão de circuito aberto dos módulos fotovoltaicos. A tensão de circuito aberto está presente nos terminais dos módulos quando estes não fornecem corrente elétrica.

Strings são conjuntos de módulos ligados em série. Geralmente, quando se constrói um sistema fotovoltaico, os módulos são primeiramente ligados em série, formando *strings*, para proporcionar a tensão de trabalho adequada. Para aumentar a potência do sistema acrescentam-se *string* em paralelo, formando conjuntos fotovoltaicos com vários *strings*.

Os inversores podem ser equipados com um ou mais sistemas de MPPT. Todos os inversores para conexão à rede possuem MPPT, o que significa que são preparados para maximizar a potência fornecida pelos módulos fotovoltaicos, fazendo-os operar constantemente em seu ponto de máxima potência, independentemente das condições que afetam o desempenho e alteram a curva característica de corrente e tensão do conjunto de módulos.

Os inversores operam no Brasil na frequência de 60 Hz. Em geral os fabricantes disponibilizam versões dos inversores em 50 Hz e 60 Hz, de acordo com o país onde é comercializado.

A distorção da corrente injetada na rede significa que, a forma de onda da corrente é uma onda senoidal pura. Em geral as normas permitem distorção de corrente de até 5%.

O grau de proteção de um equipamento fornece informações sobre sua capacidade de operar em ambientes agressivos, suportando chuva, calor, frio e poeira.

O inversor é especificado para operar dentro de uma faixa de temperatura, como todo equipamento eletrônico. Temperaturas excessivamente baixas ou altas podem danificar o equipamento ou impedir o seu correto funcionamento.

Os inversores fotovoltaicos podem falhar em ambientes muito úmidos. Em ambientes com elevada umidade relativa do ar, como regiões litorâneas e amazônicas, deve-se considerar a instalação dos inversores em locais fechados e secos.

O inversor consome energia mesmo quando está parado. Esse consumo está relacionado com o funcionamento dos circuitos internos do equipamento mesmo quando o inversor não está em operação e os módulos fotovoltaicos não estão produzindo energia. Esta situação ocorre quando existe tensão fornecida pelos módulos fotovoltaicos, mas por alguma razão o inversor está desligado.

O consumo noturno informado pelo fabricante diz respeito ao consumo de energia do inversor em *stand by* (modo de espera). À noite, quando não existe a possibilidade de os módulos fotovoltaicos fornecerem energia, o inversor é desligado automaticamente e apenas suas funções mínimas permanecem ativas, consumindo uma quantidade pequena de energia, equivalente a 0,25W (VILLALVA, 2014).

2.2 QUALIDADE DA ENERGIA

Qualidade da energia elétrica (QEE) é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil (LEÃO, SAMPAIO E ANTUNES, 2014). De acordo com os autores a expressão é usada para descrever a condição do sinal elétrico que aciona uma carga, fazendo-a operar adequadamente. Com uma alimentação inadequada, a carga pode funcionar com desvios, falhar prematuramente ou até mesmo não funcionar.

O sinal de tensão elétrica usado como padrão de qualidade tem forma de onda alterada senoidal, de frequência fixa e variação de amplitude conforme a modalidade de atendimento: baixa tensão, média tensão e alta tensão. No entanto, em cada modalidade, o valor eficaz de tensão deve estar dentro de faixas pré-estabelecidas; a corrente elétrica deve ter mesma forma de onda da tensão e manter o deslocamento angular (LEÃO, SAMPAIO E ANTUNES, 2014).

2.3 DISTÚRBIOS

A QEE é aplicada a uma grande variedade de fenômenos eletromagnéticos dos sistemas elétricos. A recomendação IEEE Standard 1159-1995 define com exatidão cada um dos fenômenos existentes procurando evitar a ambiguidade entre os conceitos. Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, no seu módulo 8, define alguns fenômenos em regime permanente e transitório, tais como, tensão em regime permanente, fator de potência, distorção de harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência e variações de tensão de curta duração (VTDC).

2.3.1 Tensão em regime permanente

Tanto os equipamentos da concessionária como os pertencentes aos consumidores são projetados para operar em determinado nível de tensão. A operação prolongada desses equipamentos em uma tensão fora dos limites aceitáveis pode afetar o seu correto funcionamento reduzindo a sua vida útil ou até mesmo causando interrupções não programadas, por isso, a tensão deve ser mantida dentro de limites aceitáveis.

O termo regime permanente compreende o intervalo de tempo da leitura de tensão, definindo como sendo de dez minutos, onde não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura. Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, deve ser calculado o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o índice para tensão crítica (DRC), como visto nas Equações 1 e 2 a seguir:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%] \quad (2)$$

Onde nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente.

Para se caracterizar a tensão precária e a tensão crítica, define-se, primeiramente, o conceito de tensão de atendimento. Este é o valor eficaz de tensão no ponto de entrega ou de conexão, obtido por meio de medição, podendo ser classificada em adequada, precária ou

crítica. Como exemplo de valores de tensão em atendimento críticos em 220V, tem-se os seguintes intervalos: valores menores que 189V e valores maiores do que 233V.

Os valores apurados de DRP e DRC deverão ser registrados pela concessionária e, se for o caso, devem ser tomadas providências para a normalização e conformidade dos níveis de tensão, de acordo com a legislação do setor elétrico.

2.3.2 Fator de potência

O fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Como visto na Equação 3 a seguir:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3)$$

Esse indicador determina o rendimento com que a potência ativa está sendo transferida para a carga. O fator de potência só pode ser considerado igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no caso de ambas as grandezas serem senóides puras, ou seja, não possuam componentes harmônicas.

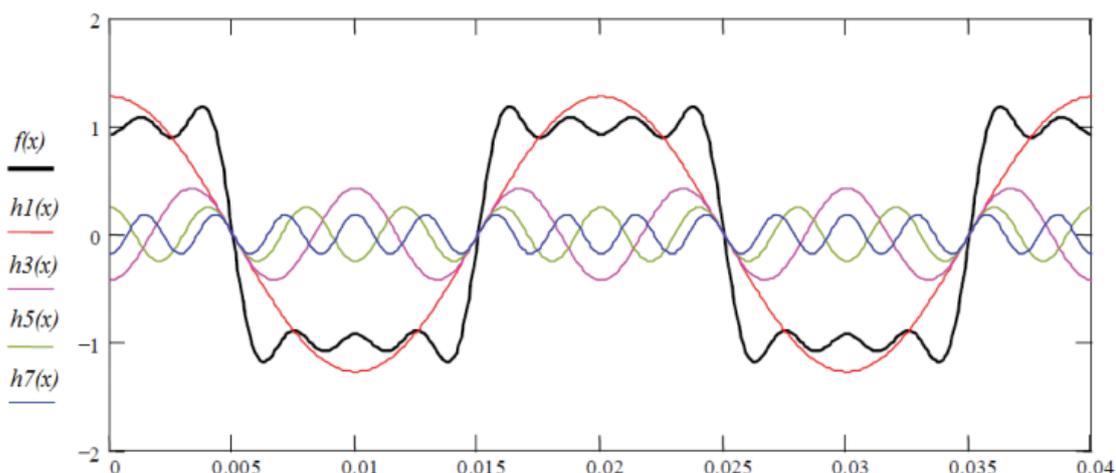
Segundo o PRODIST, módulo 8, para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230kV, o fator de potência no ponto de conexão deve ser compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com o que irá ocorrer no sistema com geração.

2.3.3 Distorção harmônica

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

As harmônicas são uma representação matemática de uma forma de onda distorcida. Através da transformada de Fourier, uma onda periódica e distorcida (função periódica) pode ser substituída por uma soma de ondas senoidais puras com frequências múltiplas da fundamental. A Figura 7 representa uma função $f(x)$, composta pela soma de sua componente fundamental, $h1(x)$, e suas harmônicas: $h3(x)$, $h5(x)$ e $h7(x)$ (frequências múltiplas à fundamental). Tal função se aproxima de uma onda quadrada e ao passo que infinitas harmônicas sejam somadas, melhor será a representação.

Figura 7 – Composição de uma onda pelo somatório de harmônicas.



Fonte: (DECKMANN E POMILIO, 2016)

O Quadro 2 sintetiza a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

Quadro 2 – Terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

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	$h_{máx}$
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: (ANEEL, 2018)

As expressões para o cálculo das grandezas são vistas abaixo, na Equação 4 vimos a $DTT_h\%$, na Equação 5 vimos a $DTT\%$, na Equação 6 vimos a $DTT_p\%$, na Equação 7 vimos a $DTT_i\%$ e na Equação 8 vimos a $DTT_3\%$.

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (4)$$

Sendo:

h=ordem harmônica individual.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (5)$$

Sendo:

h=todas as ordens harmônicas de 2 até h_{máx}.

h_{máx}=conforme classe A ou S.

$$DDT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (6)$$

Sendo:

h=todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h=2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38,...).

h_p=máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DDT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (7)$$

Sendo:

h=todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37,...).

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

$$DDT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (8)$$

Sendo:

h=todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h=3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39,...).

h₃=máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os limites para distorções harmônicas totais constam no Quadro 3.

Quadro 3 – Linhas das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{P95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL, 2018)

2.3.4 Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

A expressão para o cálculo do desequilíbrio da tensão é vista abaixo na Equação 9:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (9)$$

Alternativamente, pode-se utilizar a Equação 10 e a Equação 11 a seguir, que conduz a resultados de acordo com a formulação anterior:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (10)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (11)$$

Onde FD é o fator de desequilíbrio de tensão.

V_- é a magnitude da tensão eficaz de sequência negativa - frequência fundamental.

V_+ é a magnitude da tensão eficaz de sequência positiva - frequência fundamental.

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} são as magnitudes das tensões eficazes de linha - frequência fundamental.

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão estão apresentados no Quadro 4 e correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição, onde FD_{95%} é o valor indicador FD% que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.

Quadro 4 – Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: (ANEEL, 2018)

2.3.5 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. A determinação da qualidade da tensão no sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

Essas flutuações são conhecidas como Pst (severidade de flutuação de tensão de curta duração) e Plt (severidade de flutuação de longa duração), as expressões para o cálculo serão mostradas nas equações 12 e 13 a seguir:

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0.1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (12)$$

Pi (i = 0.1; 1; 3; 10; 50) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante i% do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad (13)$$

A Pst representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. Da mesma forma, a Plt representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas.

O quadro 5 fornece os limites a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão.

Quadro 5 – Limites para flutuação de tensão.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Fonte: (Aneel, 2018)

2.3.6 Variação de frequência

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando há ocorrências de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

Havendo necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não pode exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz em condições extremas, pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5Hz por no máximo 10 (dez) segundos, pode permanecer abaixo de 56,5 Hz no máximo por 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 (cinco) segundos.

2.3.7 Variação de tensão de curta duração (VTDC)

Variações de tensão de curta duração (VTDC) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Essas VTDC são classificadas como visto no Quadro 6.

Quadro 6 – Classificação das variações de tensão de curta duração.

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

Fonte: (Aneel, 2018)

As expressões para o cálculo dos indicadores associados com as variações de tensão de curta duração são vistas na Equação 14, Equação 15 e Equação 16 a seguir:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100 \quad (14)$$

Sendo:

V_e = amplitude do evento de VTDC (em %);

V_{res} = tensão residual do evento de VTDC (em volt);

V_{ref} = tensão de referência (em volt).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (15)$$

Sendo:

Δt_e = duração do evento de VTDC (em milissegundos);

t_f = instante final do evento de VTDC;

t_i = instante inicial do evento de VTDC.

$$f_e = n \quad (16)$$

Sendo:

f_e = frequência de ocorrência de eventos de VTDC;

n = quantidade de eventos de VTDC registrados no período de avaliação.

O Fator de Impacto, para caracterização da severidade da incidência de eventos de VTDC, é calculado conforme a Equação 17 a seguir:

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} * fp_i)}{FI_{base}} \quad (17)$$

Sendo:

f_{ei} = frequência de ocorrência de eventos de VTDC, apuradas por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I .

fp_i = fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração.

FI_{BASE} = Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 (trinta) dias de VTDC para cada região de sensibilidade. O Fator de Impacto, juntamente com o fator de ponderação, são indicados no Quadro 7.

Quadro 7 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal.

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (fp)	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

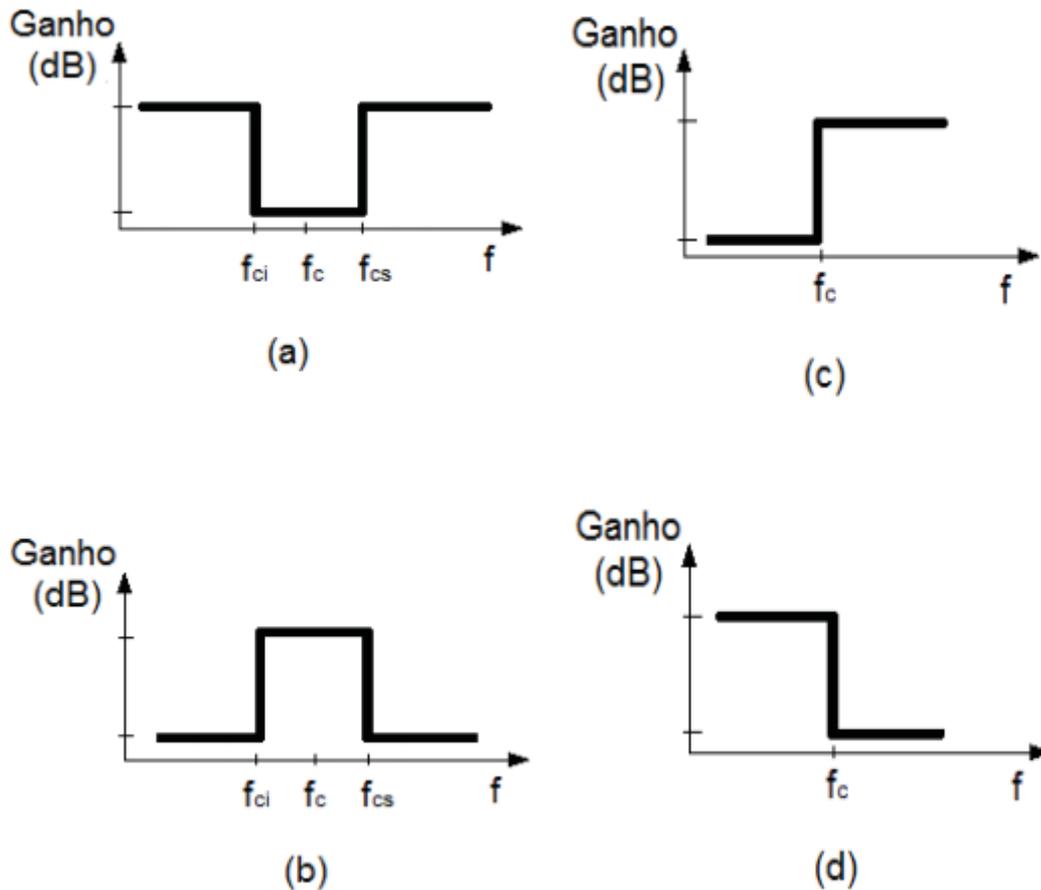
Fonte: (ANEEL, 2018)

2.4 FILTROS

Filtro é um circuito que apresenta um comportamento típico em função da frequência do sinal a ele aplicado, permitindo a passagem de sinais com certas frequências, enquanto suprime sinais com outras frequências (BRADSHAW, 1987). Os filtros representam a maneira mais adequada para promover a redução dos módulos das correntes e tensões nas diversas frequências harmônicas. Sua aplicação promove uma maior aproximação da característica senoidal da tensão elétrica conforme as formas de onda encontradas na geração. Seu

funcionamento dá-se de forma a restringir ou permitir a passagem de determinadas frequências. Quanto à resposta em frequência, os filtros são classificados como: rejeita-faixa, passa-faixa, passa-alta e passa-baixa, (OLIVEIRA, 2015), como visto na Figura 8.

Figura 8 – Resposta ideal do filtro (a) rejeita-faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-alta; (d) passa-baixa.



Fonte: (OLIVEIRA, 2015).

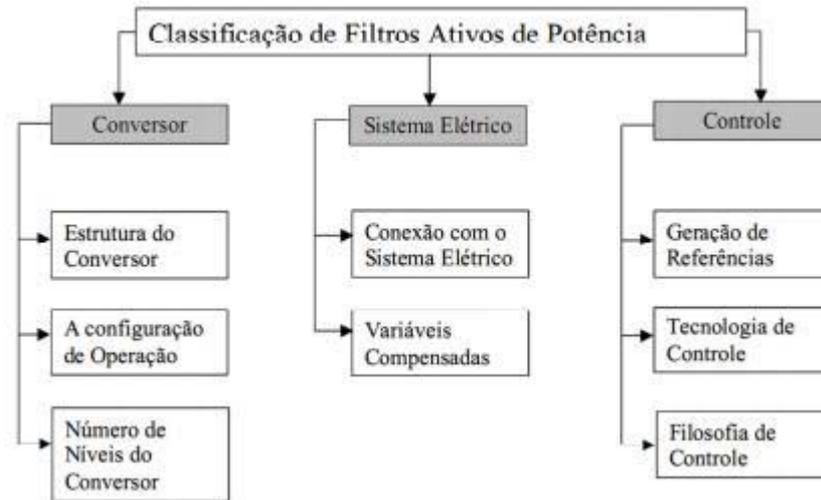
Constatada a presença de distúrbios em um sistema de distribuição que podem causar problemas de operação ou simplesmente que possam causar maiores perdas no sistema, impõem-se a necessidade de filtros, do tipo passivo ou ativo.

2.4.1 Filtros Ativos

Filtros ativos são equipamentos eletrônicos capazes de atenuar com elevado grau, correntes e tensões harmônicas, elevar o fator de potência e efetuar o balanceamento de corrente nas fases de um determinado sistema elétrico trifásico. Normalmente um filtro ativo utiliza sistema de controle automático com realimentação, cuja referência de tensão ou corrente é o

parâmetro elétrico idealizado (ARAÚJO, 2012). Os filtros ativos podem ser classificados resumidamente, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Classificação dos filtros ativos de potência.



Fonte: (ARAÚJO, 2012).

A classificação de acordo com o conversor enfatiza o aspecto físico do bloco constituído principalmente por chaves semicondutoras e que execute a etapa de potência.

A classificação de acordo com o sistema elétrico apresenta a distinção, que pode ocorrer de acordo com as características do sistema elétrico onde o filtro ativo de potência será inserido, bem como quais serão as variáveis compensadas desejadas.

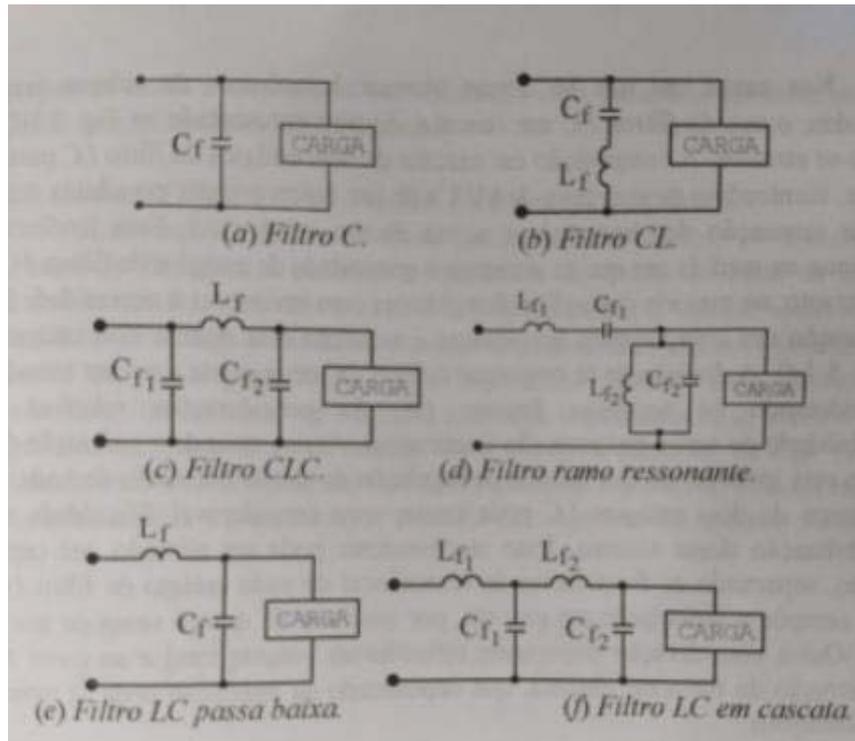
A classificação de acordo com o controle refere-se ao sensoriamento, geração de referências e execução da ação de controle que resultará no acionamento da etapa de potência (ARAÚJO, 2012).

2.4.2 Filtros Passivos

Existe uma grande variedade de topologias de filtros possíveis de serem aplicadas nos conversores CC-CA de tensão, com o objetivo de reduzir os atenuar os harmônicos que aparecem na tensão alternada de saída dos inversores. A Figura 10 mostra algumas estruturas possíveis de serem utilizadas para construção de filtros passivos. Um filtro C (a), por exemplo, é muito simples, mas ele drena mais potência reativa. Um filtro LC paralelo com a carga (b), sintonizado na frequência do harmônico pode eliminar apenas uma frequência. O filtro CLC (c), apropriadamente projetado, é muito eficaz na redução de harmônicos de uma ampla largura

de banda e drena pouca potência reativa. O filtro ramo ressonante (d), é mais apropriado para situações em que harmônicos de baixa ordem estão presentes. O filtro LC (e) passa baixa é particularmente eficiente nas aplicações onde se deseja reduzir as componentes harmônicas de ordem elevada. Nos casos em que se deseja atenuar harmônicos de valores mais elevados, o uso de filtros LC em cascata (f), tornam-se atrativos.

Figura 10 – Topologia de filtros de saída.



Fonte: (MARTINS E BARBI, 2008).

Diante de todas as topologias apresentadas na Figura 10 e levando em conta suas principais características, não se pode desconsiderar o fato de que para uma dada aplicação a escolha do filtro adequado, que permite melhorar a forma de onda da tensão alternada de saída, depende das características dessa tensão alternada de saída e da natureza da carga conectada aos terminais do inversor. Para a escolha leva-se em conta basicamente: (a) A tensão alternada de saída; (b) A variação e tipo de carga; (c) A frequência de saída; (d) O conteúdo harmônico do espectro de frequência (MARTINS E BARBI, 2008).

2.5 ANALISADOR DE ENERGIA

O *Power NET P-600*, como visto na Figura 11, é um analisador e registrador portátil de grandezas elétricas projetado para realizar medições em sistemas de distribuição. Pode ser usado para medir valores instantâneos, agregados e estatísticos para o monitoramento local ou remoto da energia elétrica.

Figura 11 – Analisador da qualidade da energia.



Fonte: Próprio autor.

Possui entrada Mini USB para comunicação com software de parametrização e descarga de dados. Sua interface foi desenvolvida para facilitar a navegação, tornando-se muito intuitiva e inteligente. Sua autonomia típica é de 7 dias para todas as grandezas com intervalo entre registro de 5 minutos.

Desenvolvido para analisar o comportamento de redes elétricas, identifica distúrbios de tensão e corrente. Atende aos padrões solicitados pelo PRODIST da ANEEL. Sua versatilidade possibilita levantamentos de curvas de carga, verificação do nível de balanceamento de redes, dimensionamento de bancos de capacitores, leitura de valores de harmônicos na rede, cálculo de custo de perdas em transformadores e alimentadores, cálculo do custo de energia por item fabricado, medição setorial e rateio de custos, diagnosticar Sistemas de Potência entre outras funções. Seu alto índice de proteção permite sua exposição ao tempo (chuva, sol, poeira...). As aplicações típicas são os estudos de eficiência energética e as análises e medições de energia devendo atender a resolução 505 da ANEEL utilizado pelas concessionárias de energia. As grandezas medidas/registradas são:

- Tensão por fase e média (V)
- Tensões Máximas e Mínimas (V)
- Corrente por fase e média (A)
- Correntes Máximas e Mínimas (A)
- Corrente de Neutro (A)
- Fator de Potência por fase e médio
- Fatores de Potência Máximos e Mínimos
- Consumo Ativo e Reativo trifásico
- Demanda Ativa e Reativa trifásica
- Energia Direta e Reversa
- Potência Ativa Instantânea por fase e média (W)
- Potência Reativa Instantânea por fase e média (VAR)
- Potência Aparente Instantânea por fase e média (VA)
- Frequência da fase (Hz)
- THD de Tensão (%)
- THD de Corrente (%)
- Harmônicas Pares de Tensão (%) até 40° ordem
- Harmônicas Pares de Corrente (%) até 40° ordem
- Harmônicas Ímpares de Tensão (%) até 41° ordem
- Harmônicas Ímpares de Corrente (%) até 41° ordem

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto consiste na análise da energia gerada por painéis fotovoltaicos e, identificadas as taxas de distorções harmônicas, construir um protótipo baseado em um filtro passivo com a finalidade de melhorar a qualidade da energia, reduzindo estes distúrbios.

3.1 VISÃO GERAL DO PROJETO

O projeto foi desenvolvido no Parque de Geração Solar da UPF, localizado ao lado do prédio do Centro Tecnológico (CETEC), com uma área de 750m², como visto na Figura 12.

Figura 12 – Parque de Geração Solar da UPF.



Fonte: Próprio autor.

O Parque de Geração Solar possui capacidade de geração de 17,55 quilowatt pico (kWp), com um total de 54 placas fotovoltaicas, sendo 48 placas conectadas em um inversor de 12kW através de 3 *strings*, Figura 13, e 6 placas fotovoltaicas conectadas a um inversor de 1,5kW, como mostra a Figura 14.

Figura 13 – Inversor de 12kW.



Fonte: Próprio autor.

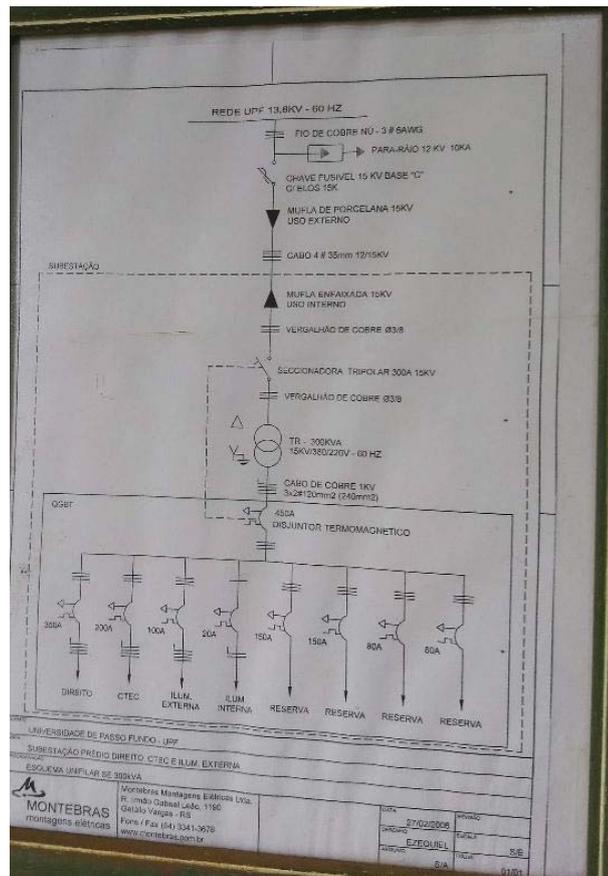
Figura 14 – Inversor de 1,5kW.



Fonte: Próprio autor.

A energia produzida é direcionada para uma subestação com transformador de 300kVA que alimenta o prédio da Faculdade de Direito e os prédios do CETEC 1 e CETEC 2, representados no diagrama unifilar da Figura 15.

Figura 15 – Diagrama Unifilar da Subestação de 300KVA.



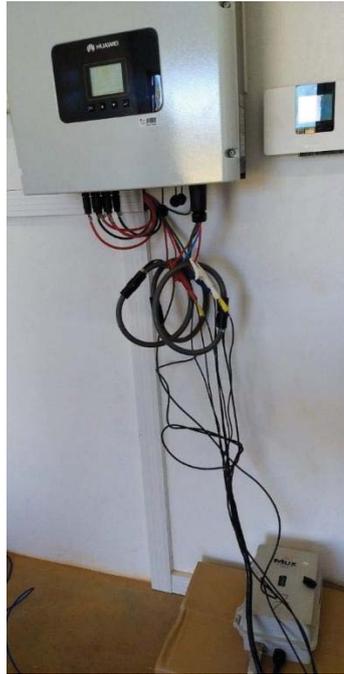
Fonte: Sistema Elétrico da UPF.

3.2 ANÁLISE DA ENERGIA

3.2.1 Análise da energia na saída do inversor

Inicialmente foi inserido na saída do inversor de 12kW o analisador *Power NET P-600* com a ajuda de Transformadores de Corrente (TC), verificando cada fase, durante 7 dias inteiros, Figura 16. Com os dados obtidos nesta medição foi feita a avaliação da energia, investigando os distúrbios existentes, utilizando o software que acompanha o equipamento.

Figura 16 – Analisador de energia instalado na saída do inversor de 12kW.

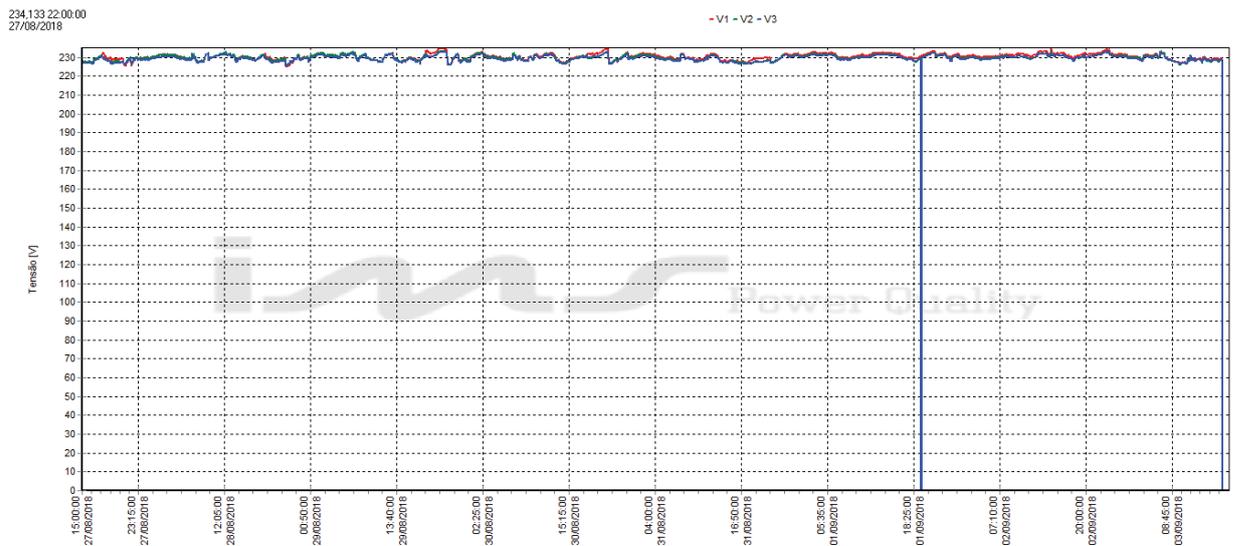


Fonte: Próprio autor.

As análises foram feitas entre os dias 27/08 a 03/09/2018 do corrente ano. Os resultados adquiridos neste período são vistos:

A Figura 17 a forma de onda da tensão.

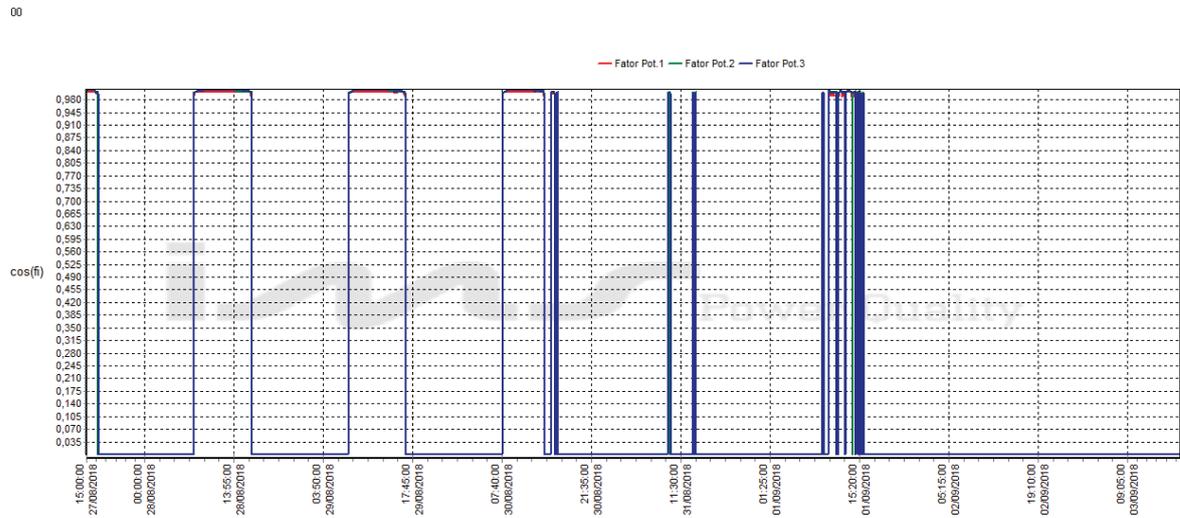
Figura 17 – Forma de Onda da Tensão.



Fonte: Software Analisador P600.

A Figura 18 mostra a forma de onda do Fator de Potência.

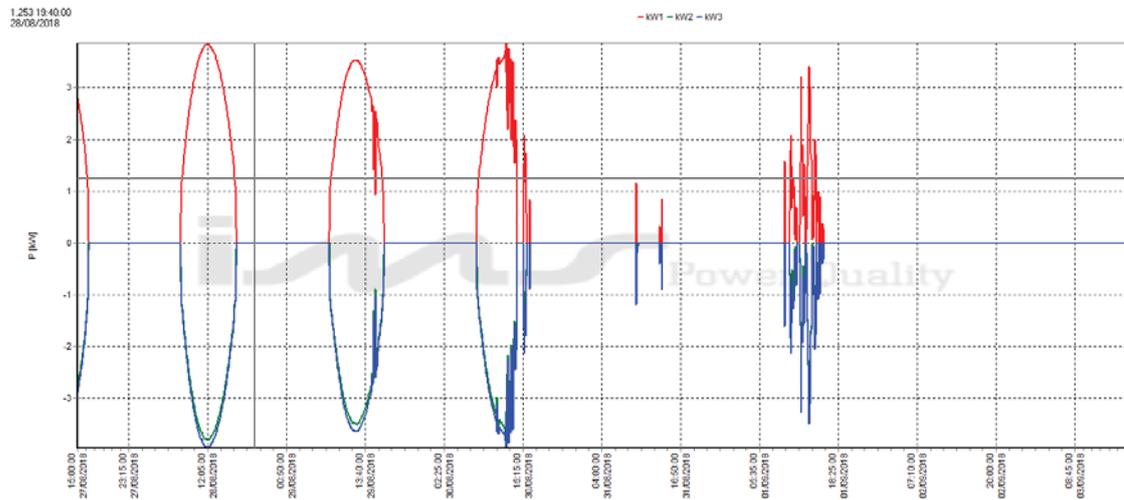
Figura 18 – Forma de Onda do Fator de Potência.



Fonte: Software Analisador P600.

A forma de onda da Potência Ativa é mostrada na Figura 19.

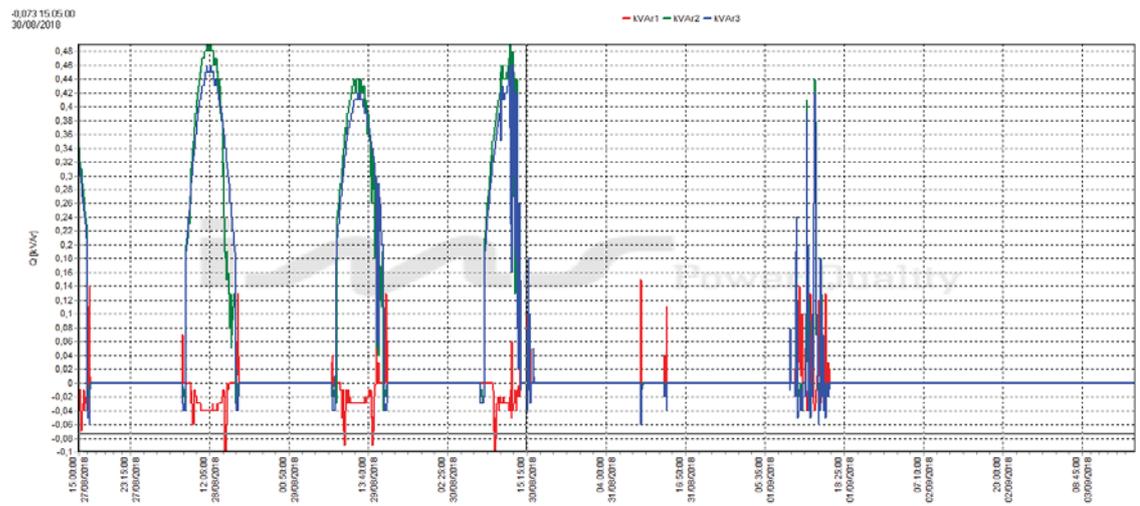
Figura 19 – Forma de Onda da Potência Ativa em kW.



Fonte: Software Analisador P600.

A Figura 20 mostra a forma de onda da Potência Reativa em kVAR.

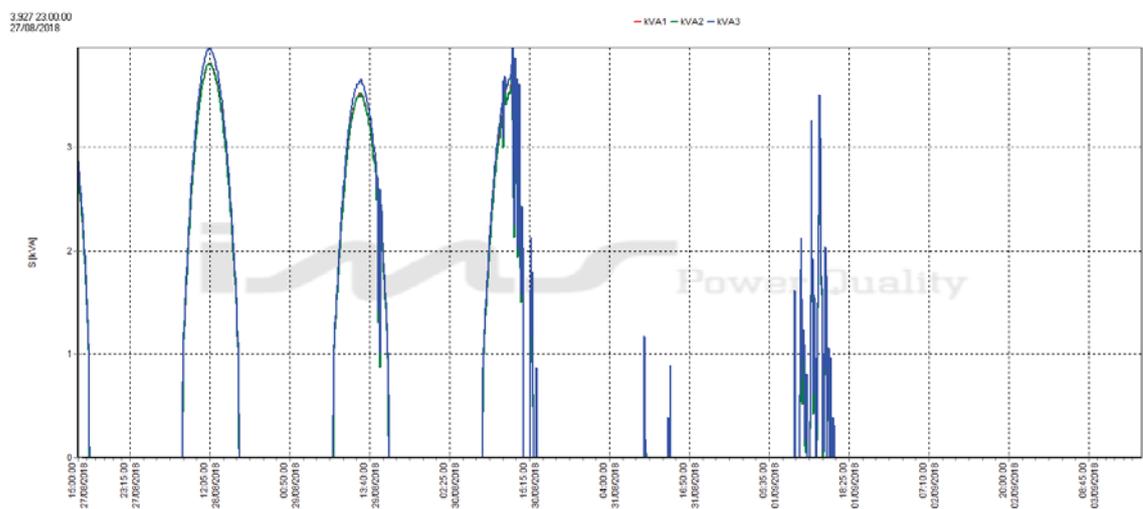
Figura 20 – Forma de Onda da Potência Reativa em kVAR.



Fonte: Software Analisador P600.

A Potência Aparente em KVA é mostrada na Figura 21.

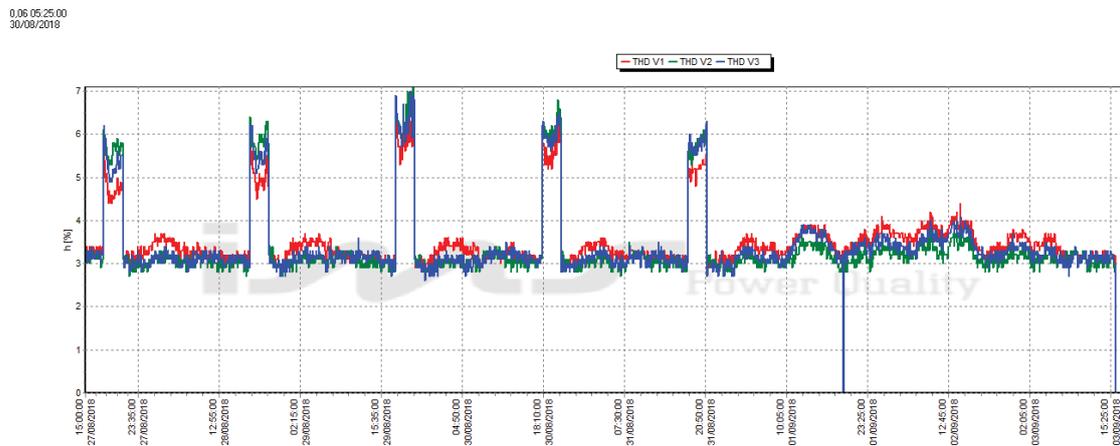
Figura 21 – Forma de Onda da Potência em kVA.



Fonte: Software Analisador P600.

Na Figura 22 é apresentado a forma de onda da THD da Tensão.

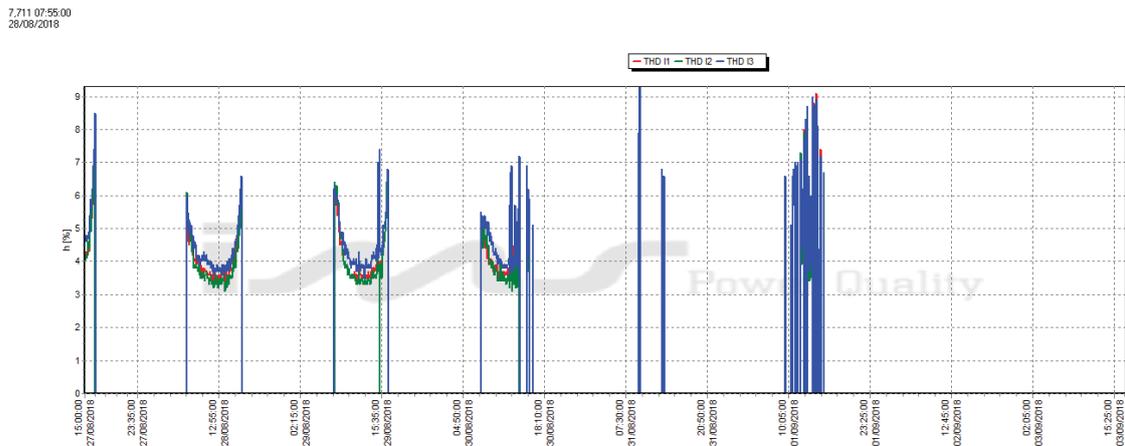
Figura 22 –Forma de Onda da THD da Tensão.



Fonte: Software Analisador P600.

Já a Figura 23 mostra a forma de onda da THD da Corrente.

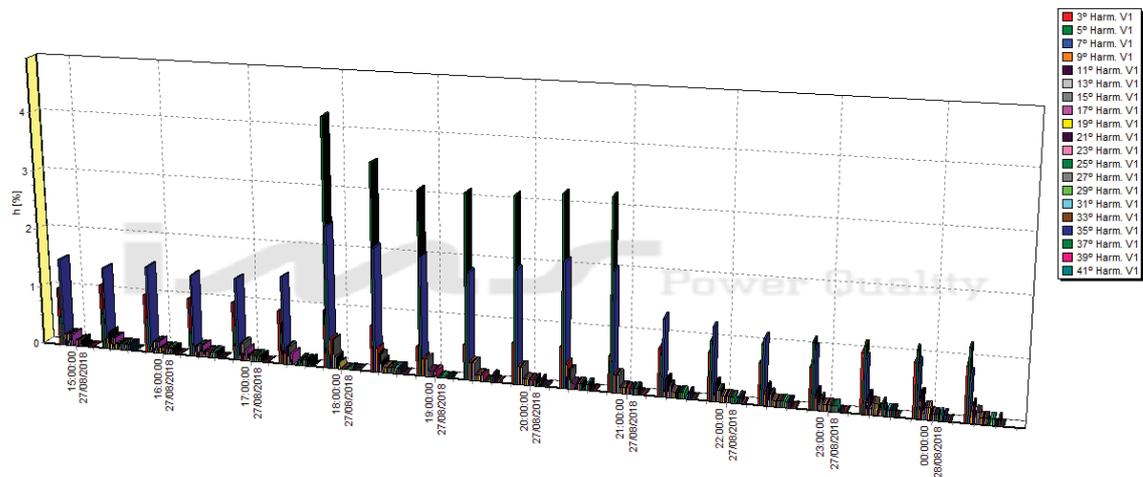
Figura 23 – Forma de Onda da THD da Corrente.



Fonte: Software Analisador P600.

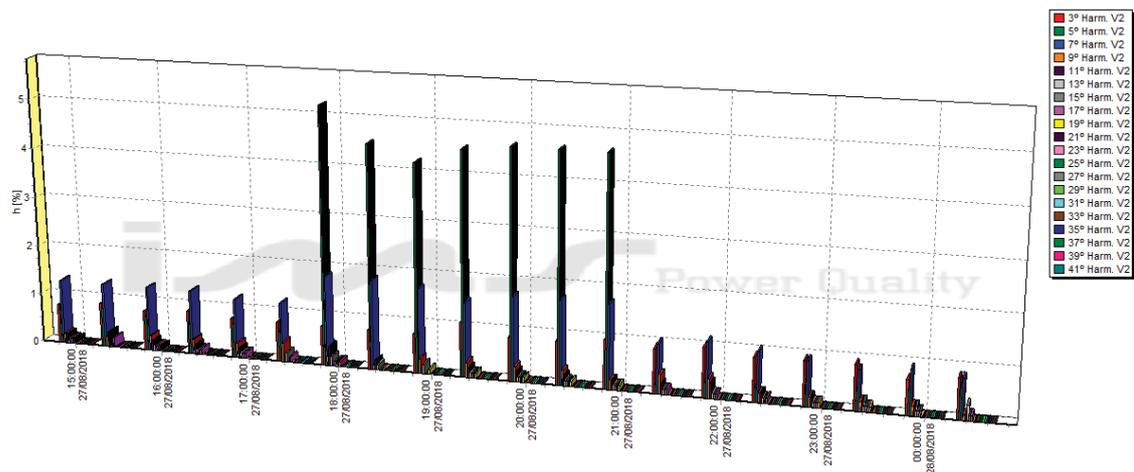
Pode-se verificar a forma de onda dos harmônicos ímpares de V1 (Figura 24), V2 (Figura 25) e V3 (Figura 26).

Figura 24 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de V1.



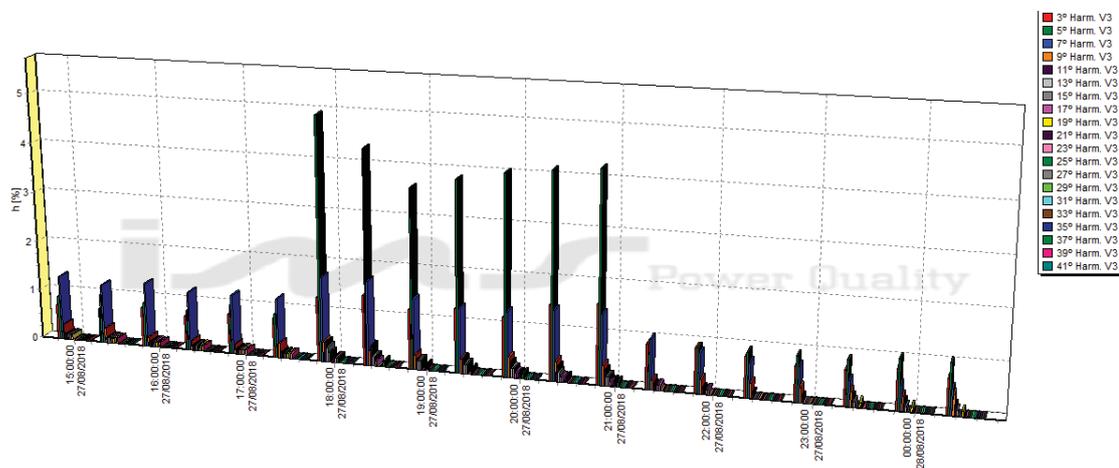
Fonte: Software Analisador P600.

Figura 25 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de V2.



Fonte: Software Analisador P600.

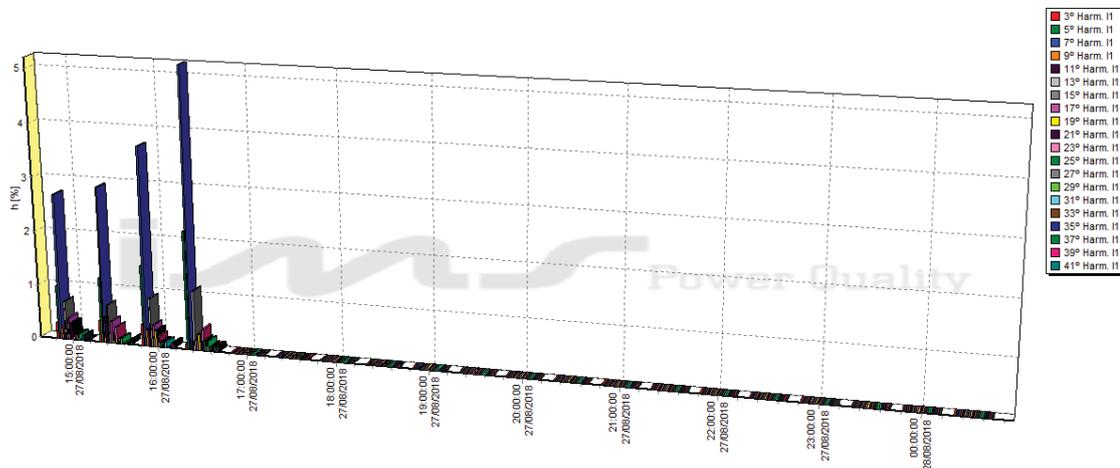
Figura 26 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de V3.



Fonte: Software Analisador P600.

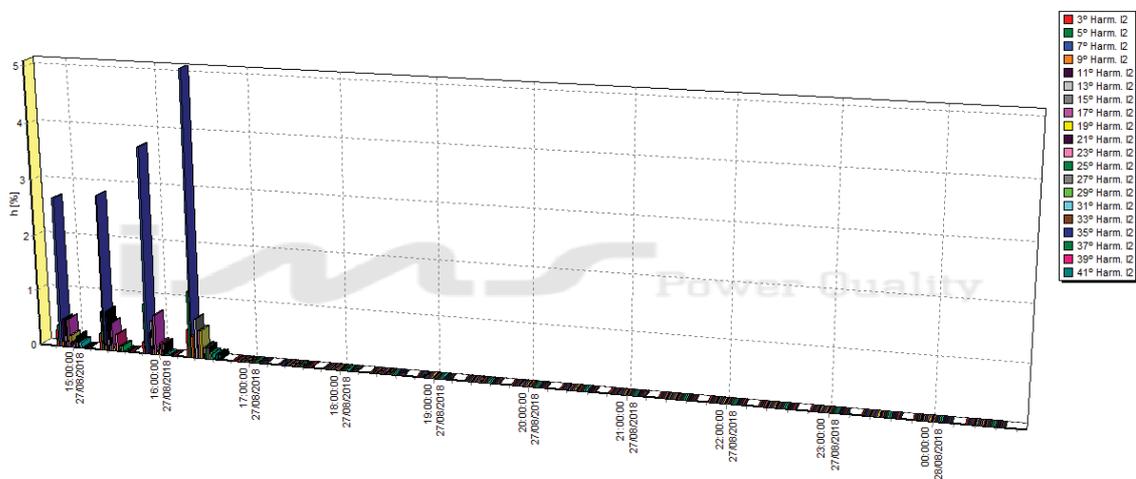
As formas de onda dos Harmônicos Ímpares de I1, I2 e I3 são mostrados nas Figura 27, Figura 28 e na Figura 29.

Figura 27 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de I1.



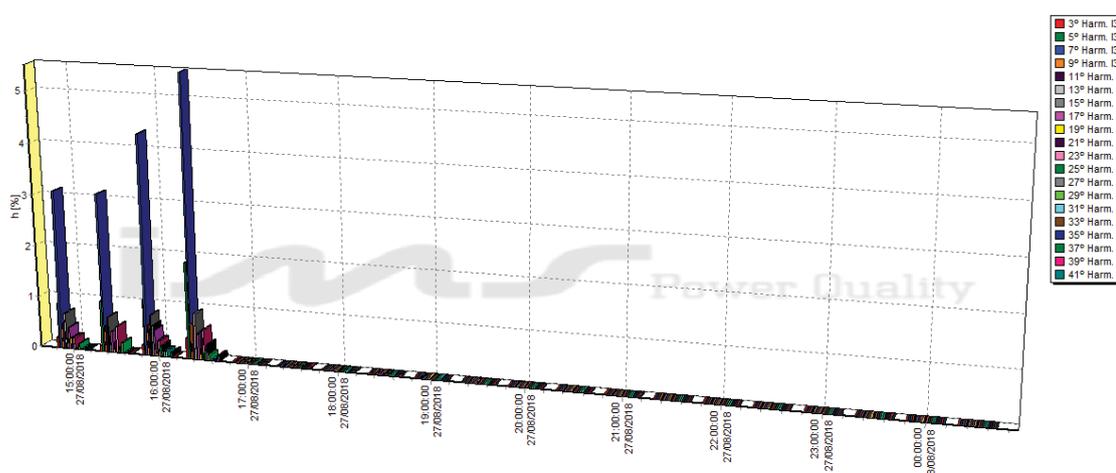
Fonte: Software Analisador P600.

Figura 28 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de I2.



Fonte: Software Analisador P600.

Figura 29 – Forma de Onda dos Harmônicos Ímpares de I3.



Fonte: Software Analisador P600.

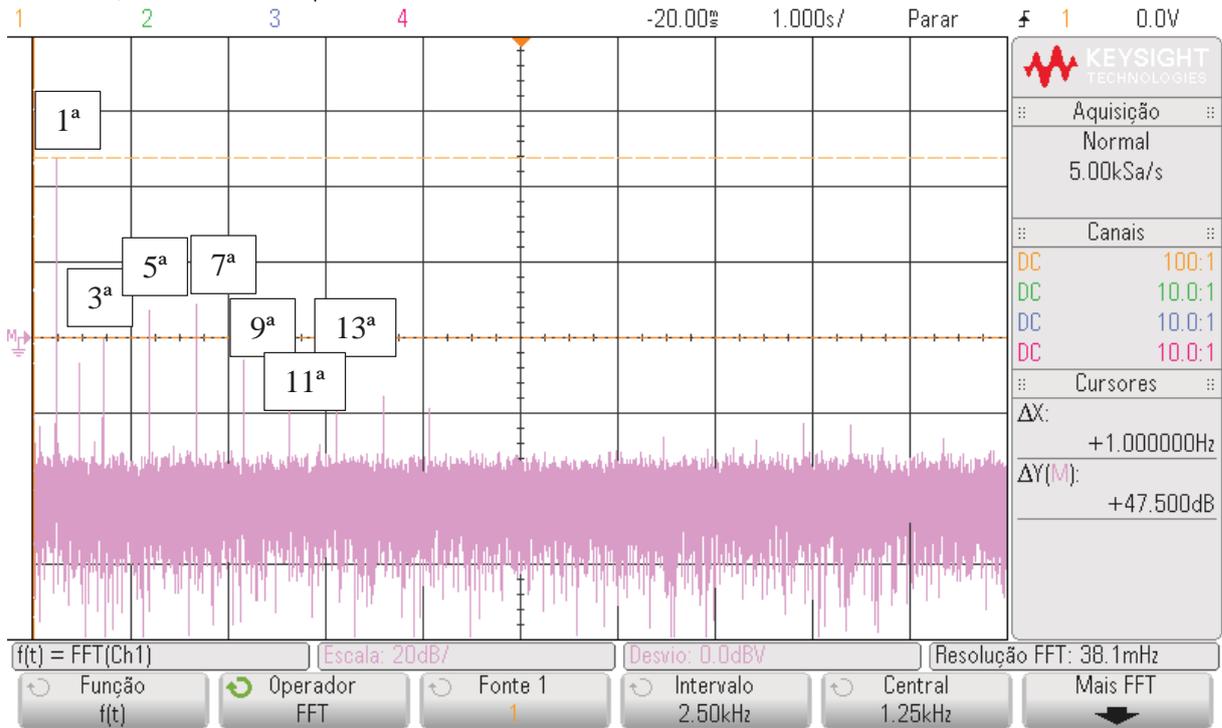
É importante salientar que no período das 18h às 21h verificou-se uma elevada taxa de distorções harmônicas que se referem a ligação do grupo gerador à diesel, que é ligado no horário de ponta. Desta forma, foi excluído esta faixa de horário neste estudo.

Posteriormente, no dia 12/09/2018 foi feita análise da energia no barramento de baixa tensão da subestação, utilizando um osciloscópio *Agilent Technologies*, que possui a função FFT, utilizada para verificação da presença das distorções harmônicas. Foram analisados, em cada fase as harmônicas com o inversor conectado e posteriormente desconectado do barramento. A Figura 30 mostra as distorções harmônicas presentes na fase R, a Figura 31 na fase S e a Figura 32 na fase T com o inversor conectado do barramento de baixa tensão.

Já a Figura 33 mostra as distorções harmônicas presentes na fase R, a Figura 34 na fase S e a Figura 35 a fase T com o inversor desconectado do barramento de baixa tensão. Desta forma concluiu-se que a Geração Distribuída Fotovoltaica não contribuía nas taxas de distorções harmônicas de tensão e corrente, devido ao fato de que a potência gerada é muito pequena em relação a potência total da rede de distribuição na qual ela está ligada. Desta forma, as distorções harmônicas de tensão e corrente que foram constatadas são provenientes das cargas ligadas a esta rede.

Figura 30 – Análise das harmônicas na fase R com o inversor conectado no barramento.

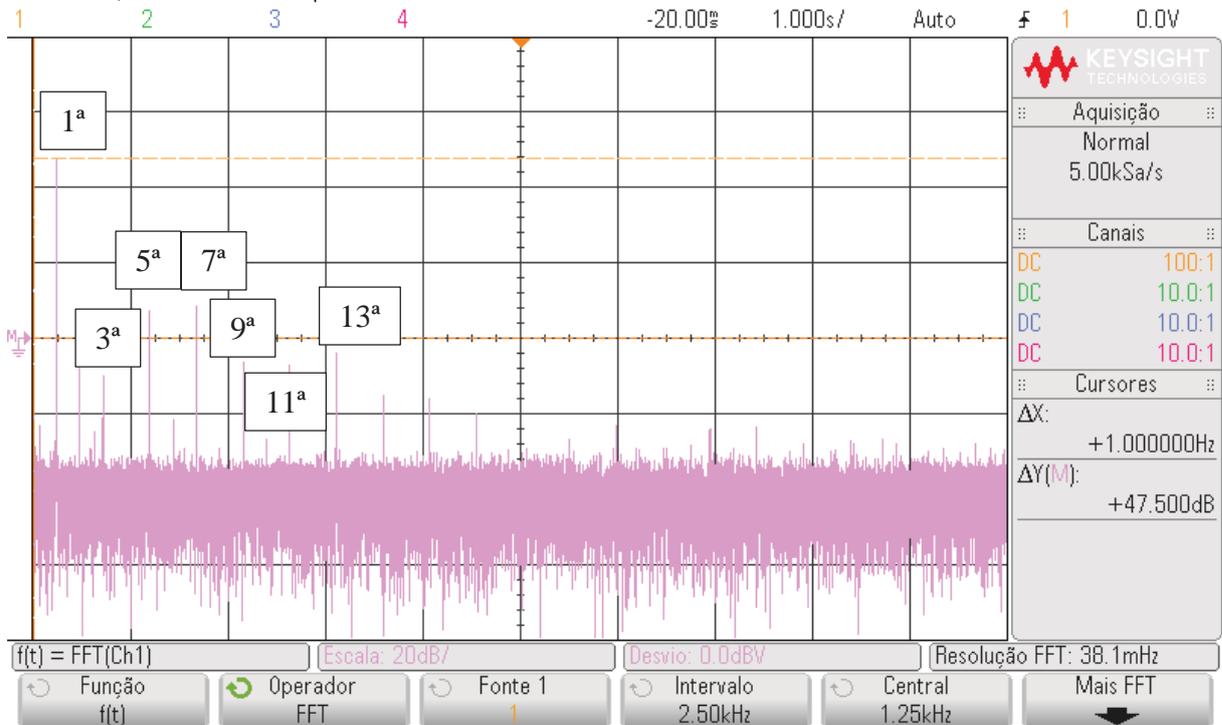
DSO-X 2004A, MY54020469: Wed Sep 12 15:23:39 2018



Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

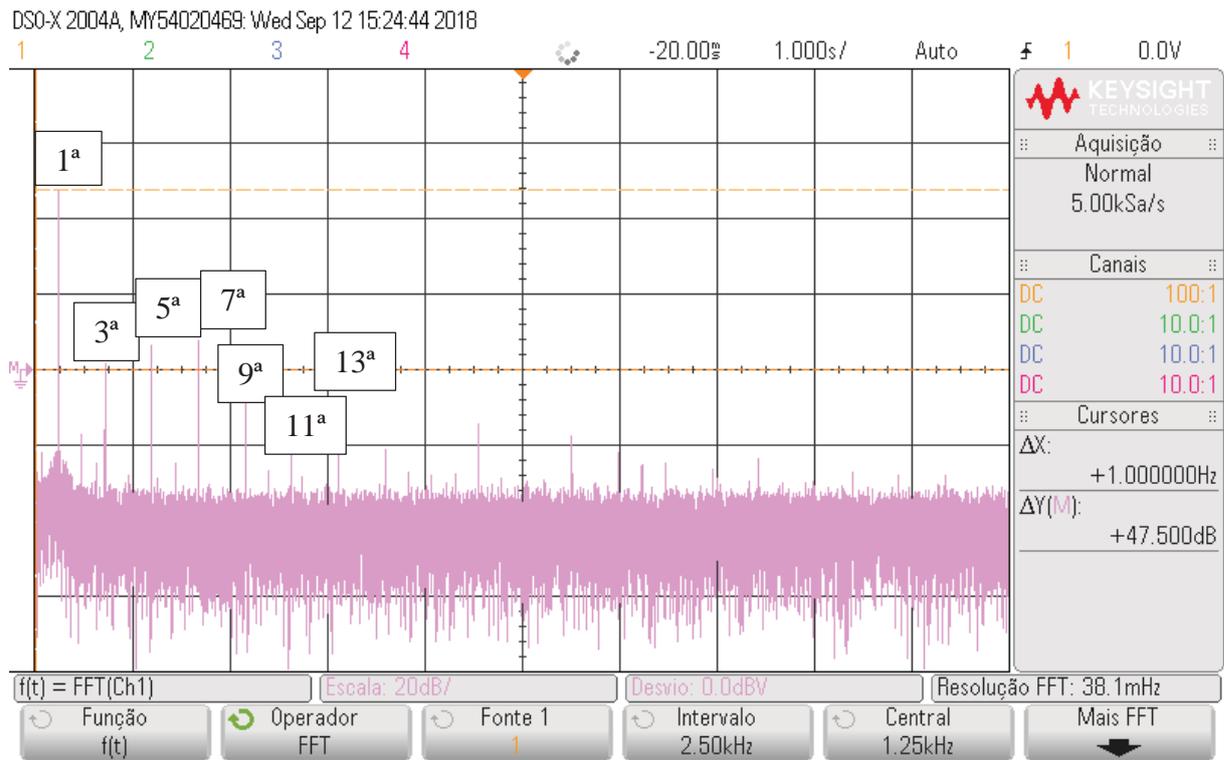
Figura 31 – Análise das harmônicas na fase S com o inversor conectado no barramento.

DSO-X 2004A, MY54020469: Wed Sep 12 15:24:17 2018



Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

Figura 32 – Análise das harmônicas na fase T com o inversor conectado no barramento.

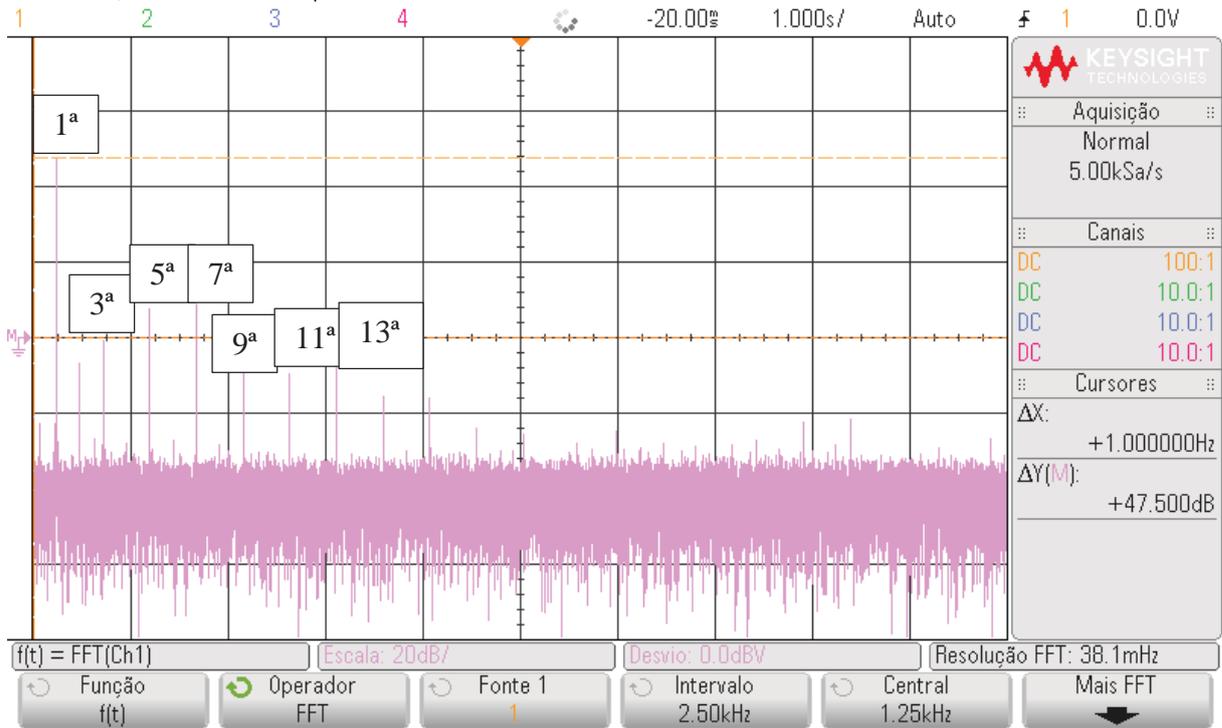


Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

Como visto nos dados analisados, as fases R, S e T, com o inversor conectado no barramento, apresentam apenas distorções harmônicas de 5ª e 7ª ordem, sendo menores que 4V.

Figura 33 – Análise das harmônicas na fase R com o inversor desconectado no barramento.

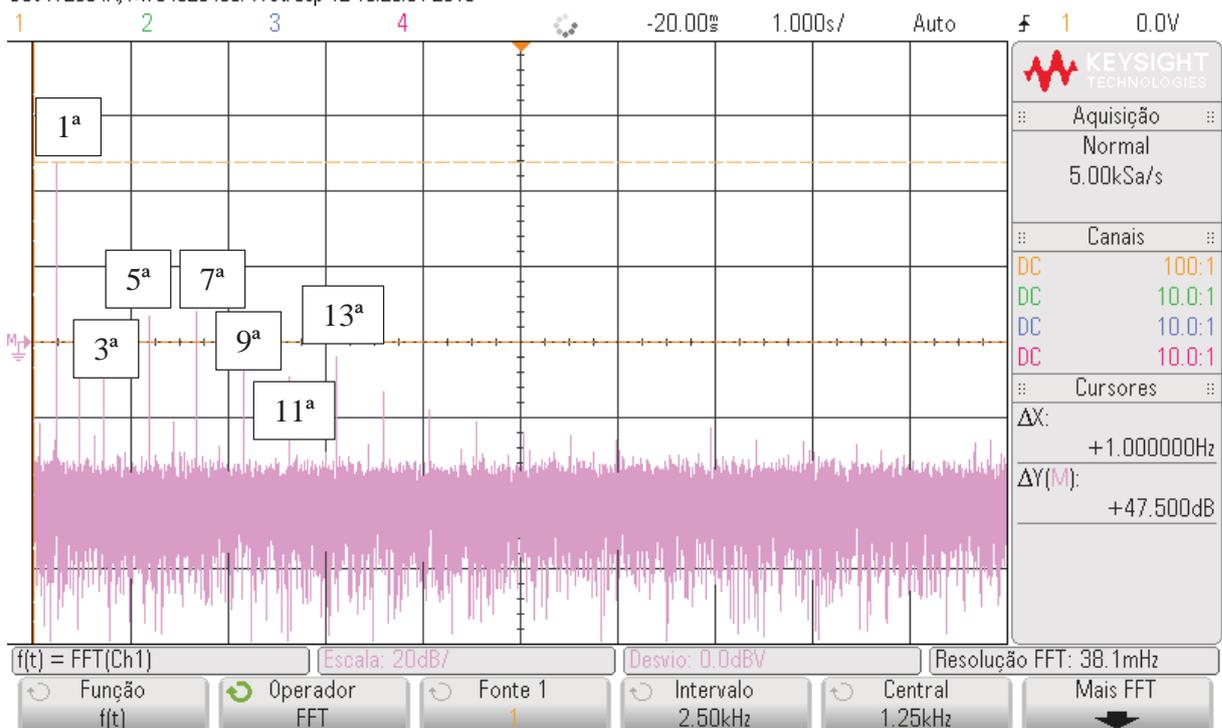
DSO-X 2004A, MY54020469: Wed Sep 12 15:27:16 2018



Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

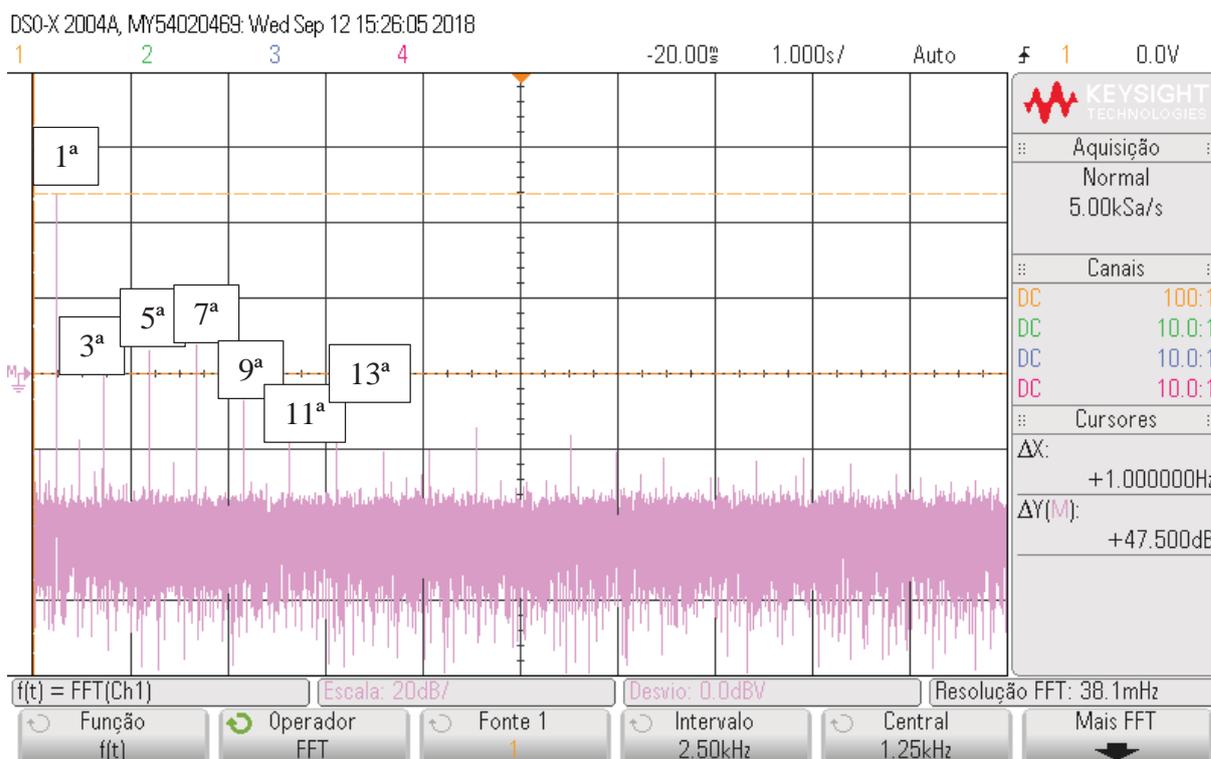
Figura 34 – Análise das harmônicas na fase S com o inversor desconectado no barramento.

DSO-X 2004A, MY54020469: Wed Sep 12 15:26:31 2018



Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

Figura 35 – Análise das harmônicas na fase T com o inversor desconectado no barramento.



Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

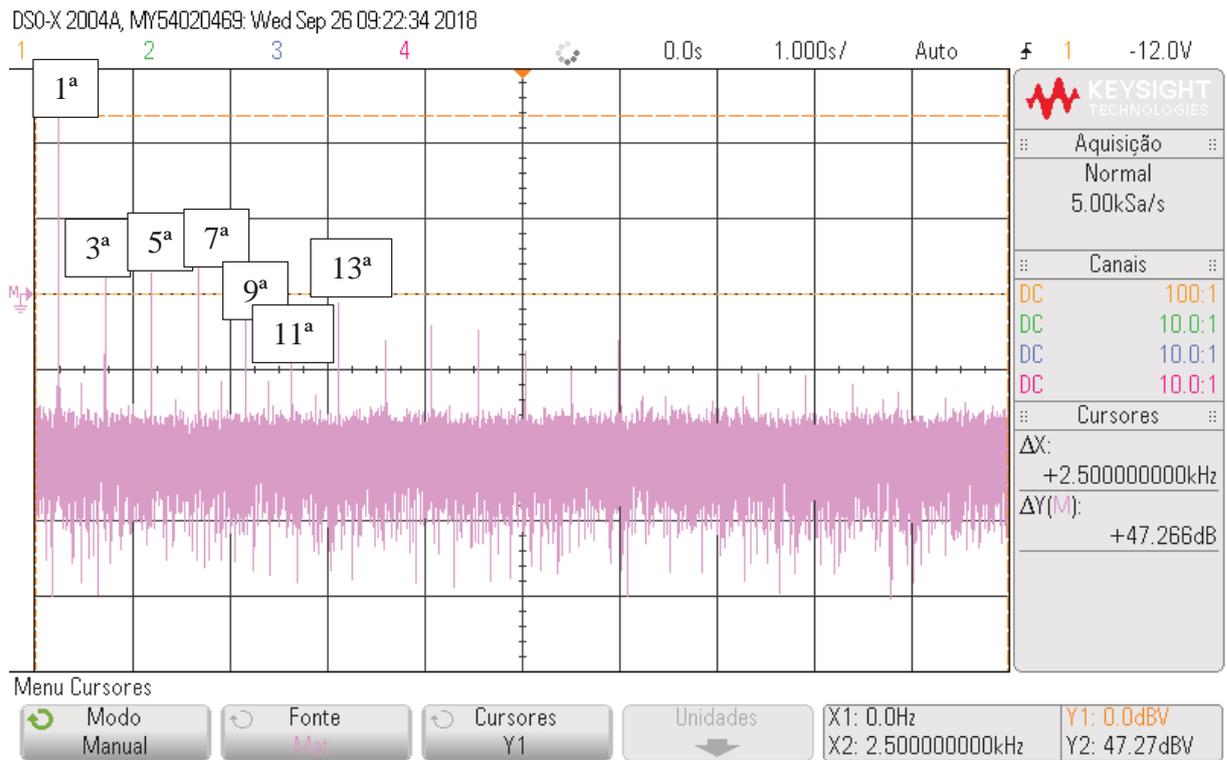
Como visto nos dados analisados, as fases R, S e T, com o inversor desconectado do barramento, apresentam distorções harmônicas iguais ao inversor conectado. Portanto, percebe-se que a geração fotovoltaica não afeta a qualidade da energia, pois a geração da energia é muito pequena em relação ao tamanho da subestação.

A partir desta constatação decidiu-se investigar junto as cargas ligadas a esta rede de distribuição buscando identificar o local onde ocorrem estas distorções harmônicas. Para isso, foi realizada a análise da energia nos prédios do CETEC 1, CETEC 2 e na Faculdade de Direito.

3.2.2 Análise da energia no QGBT dos Prédios do Cetec 1, Cetec 2 e Direito

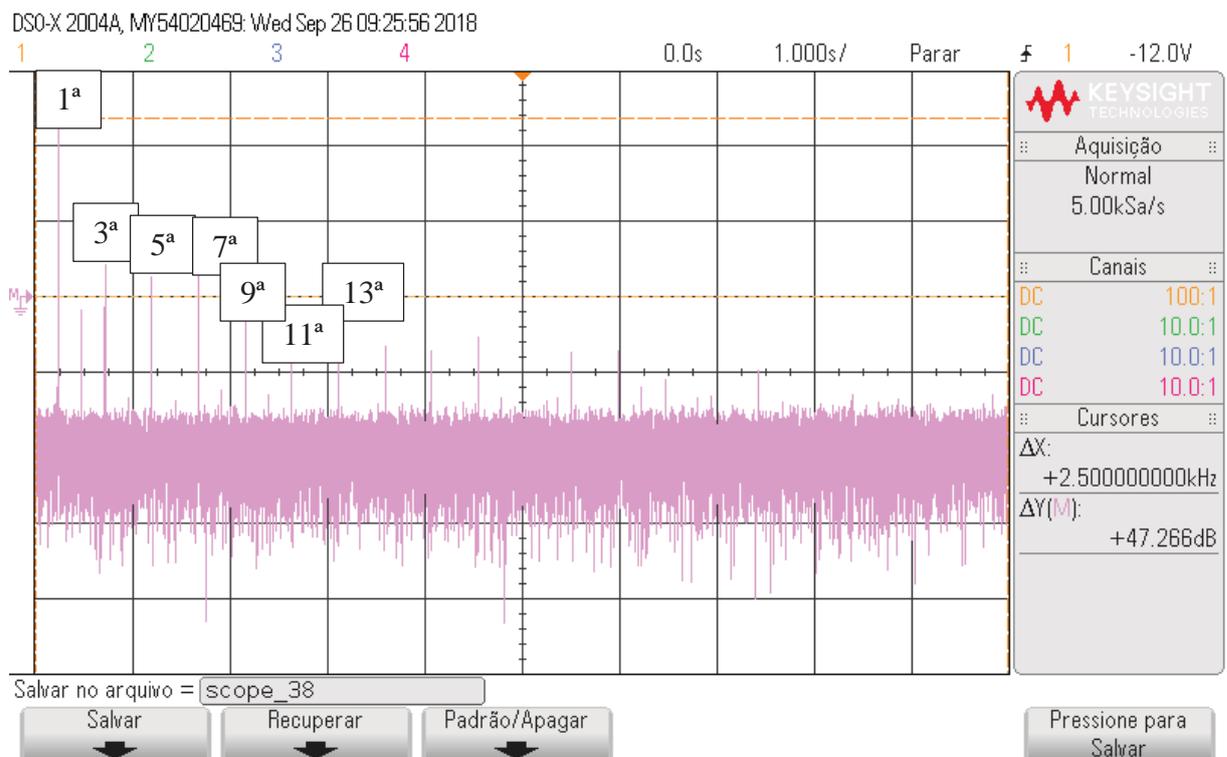
Nos dias 18 e 26/09 foram feitas análises da energia nos Quadros Gerais de Baixa Tensão (QGBT) dos prédios do Centro Tecnológico (CETEC) 1, CETEC 2 e da Faculdade de Direito, utilizando o osciloscópio *Agilent Technologies*. As formas de onda das distorções harmônicas presentes em cada fase são vistas abaixo, inicialmente no prédio do CETEC 1, na Figura 36 as harmônicas da fase R, na Figura 37 as harmônicas da fase S, na Figura 38 as harmônicas da fase T.

Figura 36 – Análise das harmônicas na fase R do QGBT do prédio CETEC 1.



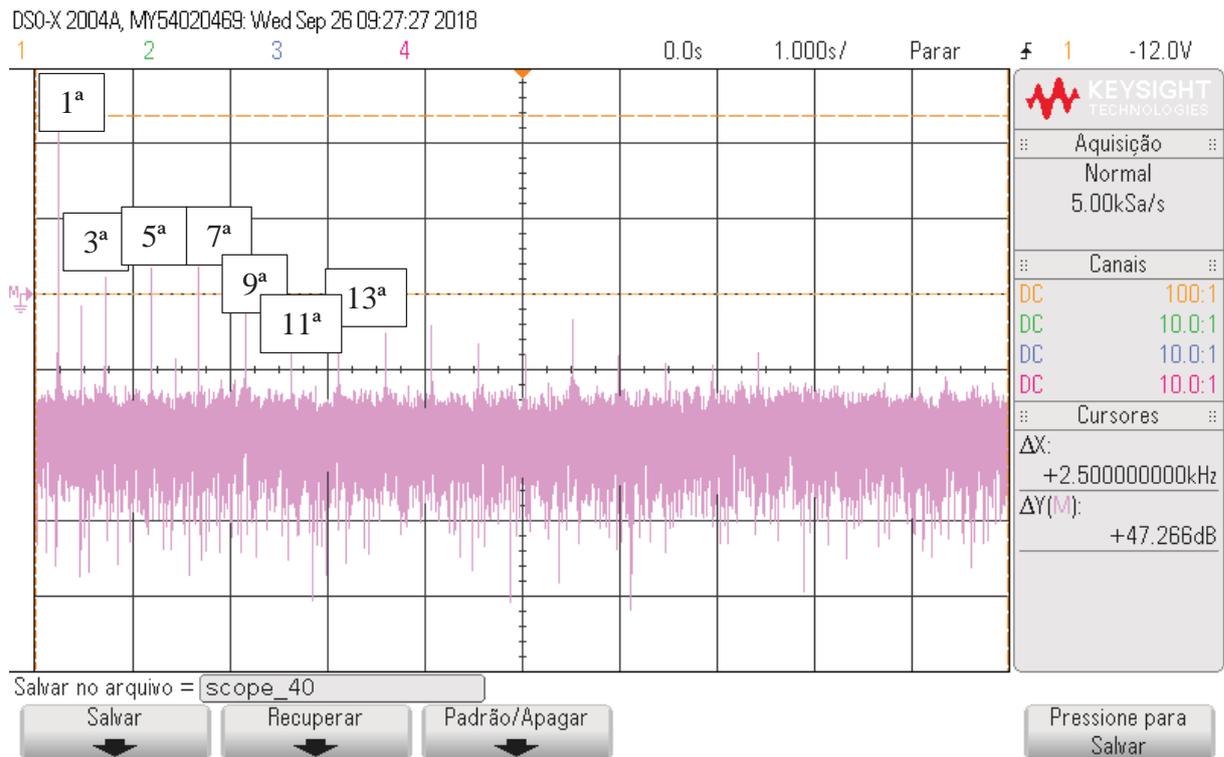
Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

Figura 37 – Análise das harmônicas na fase S do QGBT do prédio CETEC 1.



Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

Figura 38 – Análise das harmônicas na fase T do QGBT do prédio CETEC 1.

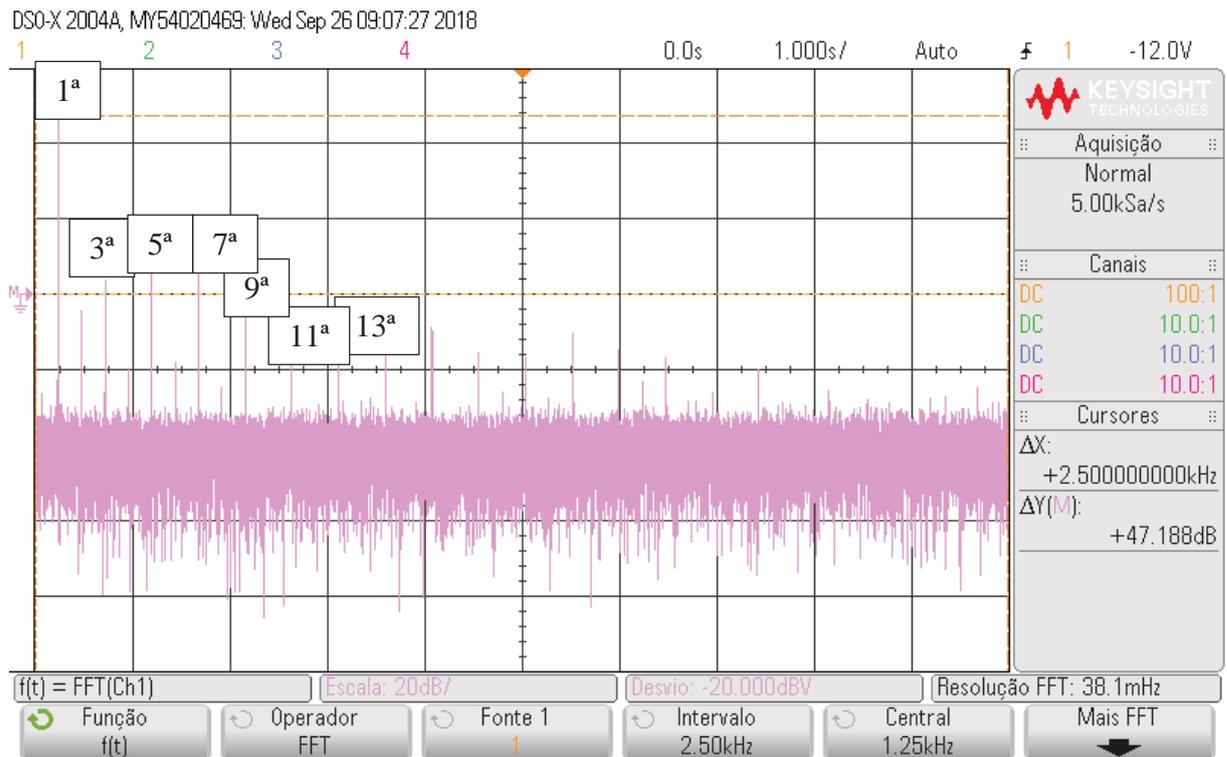


Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

Como visto nos dados analisados, as distorções harmônicas estão presentes como frequência fundamental de 3ª, 5ª e 7ª ordem, não havendo alterações em nenhuma das fases.

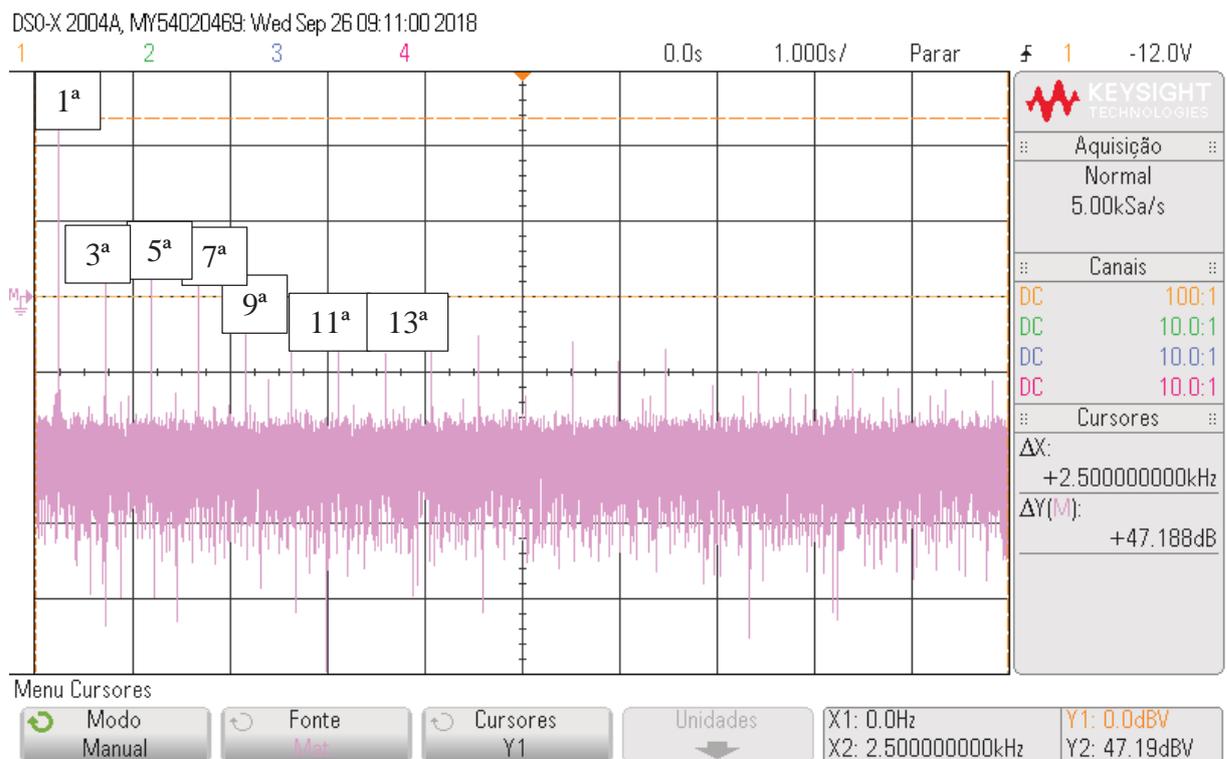
Após foram realizadas as medições no prédio do CETEC 2, que resultaram nas figuras mostradas a seguir: na Figura 39 as distorções harmônicas da fase R, na Figura 40 as distorções harmônicas da fase S e na Figura 41 as distorções harmônicas da fase T.

Figura 39 – Análise das harmônicas na fase R do QGBT do prédio CETEC 2.



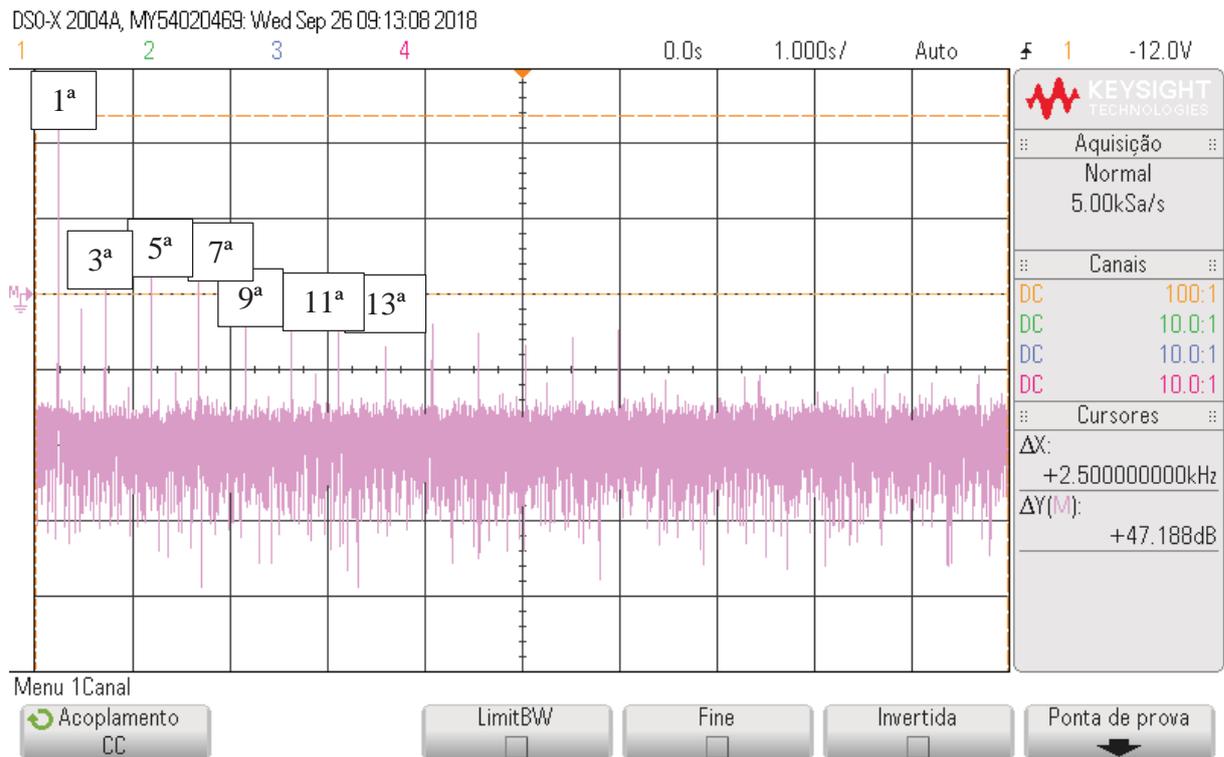
Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

Figura 40 – Análise das harmônicas na fase S do QGBT do prédio CETEC 2.



Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

Figura 41 – Análise das harmônicas na fase T do QGBT do prédio CETEC 2.

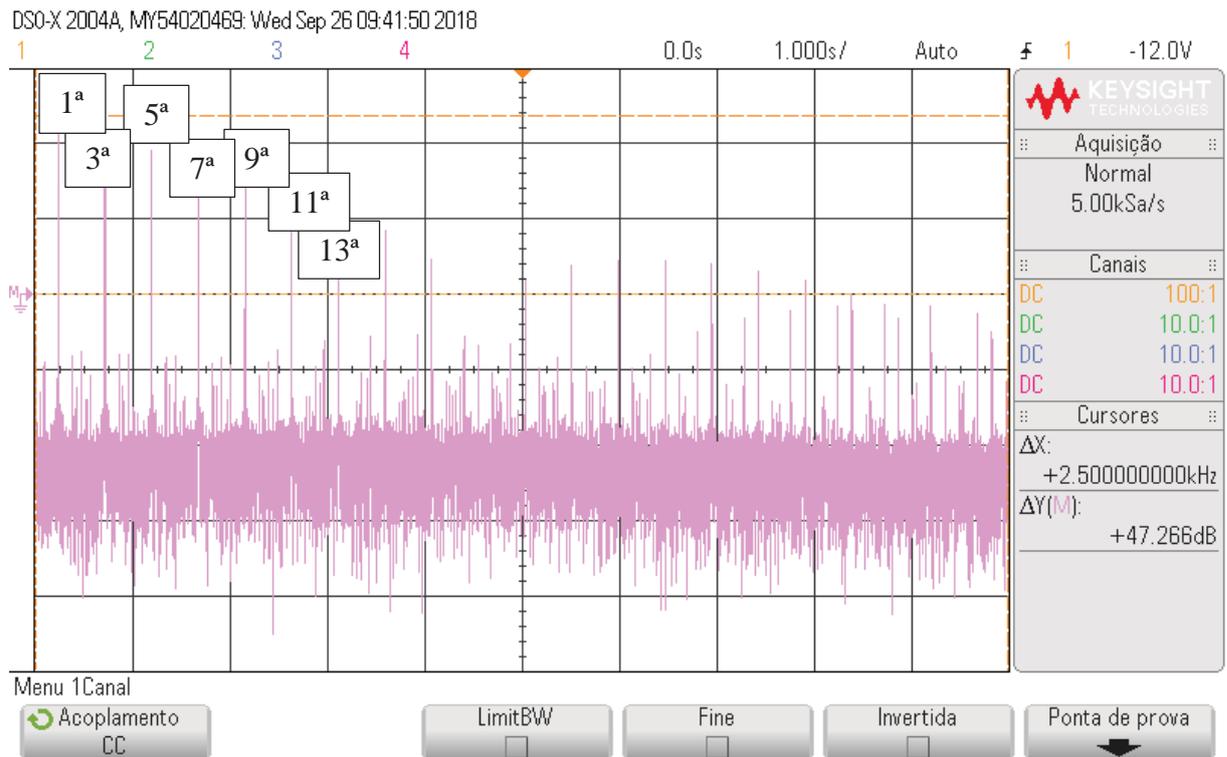


Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

Como visto, as distorções harmônicas estão presentes na frequências de 3ª, 5ª e 7ª ordem, não havendo alterações em nenhuma das fases, o mesmo ocorrido do prédio CETEC 1.

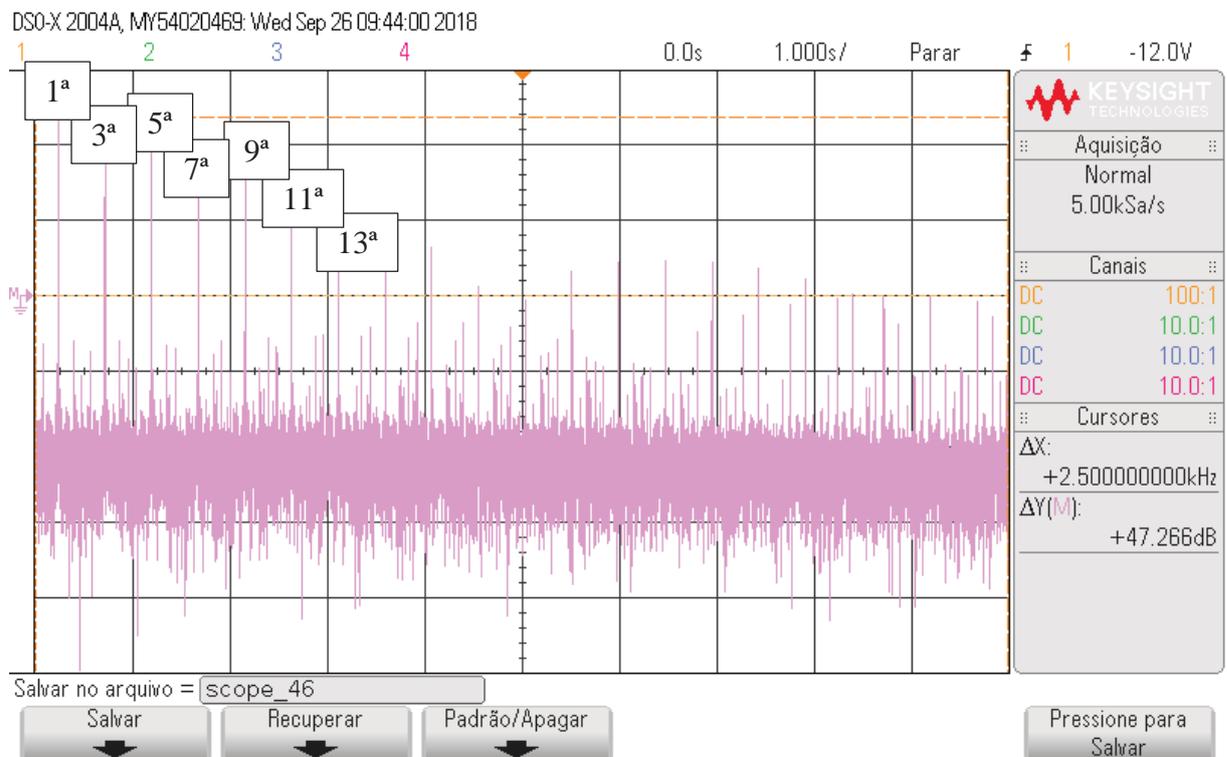
Por fim, foram realizadas as medições no prédio da Faculdade de Direito e que resultaram na Figura 42 as harmônicas da fase R, na Figura 43 as harmônicas da fase S e na Figura 44 as harmônicas da fase T.

Figura 42 – Análise das harmônicas na fase R do QGBT do prédio Direito.



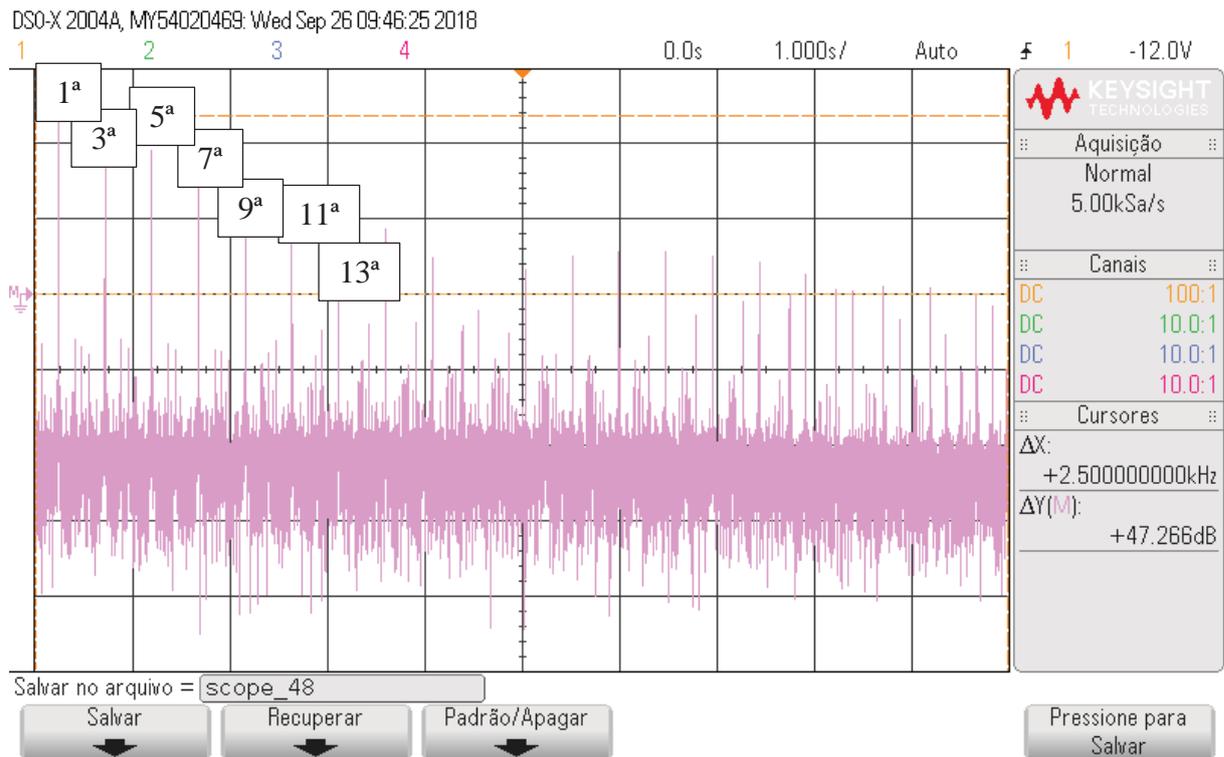
Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

Figura 43 – Análise das harmônicas na fase S do QGBT do prédio Direito.



Fonte: Osciloscópio Agilent Technologies.

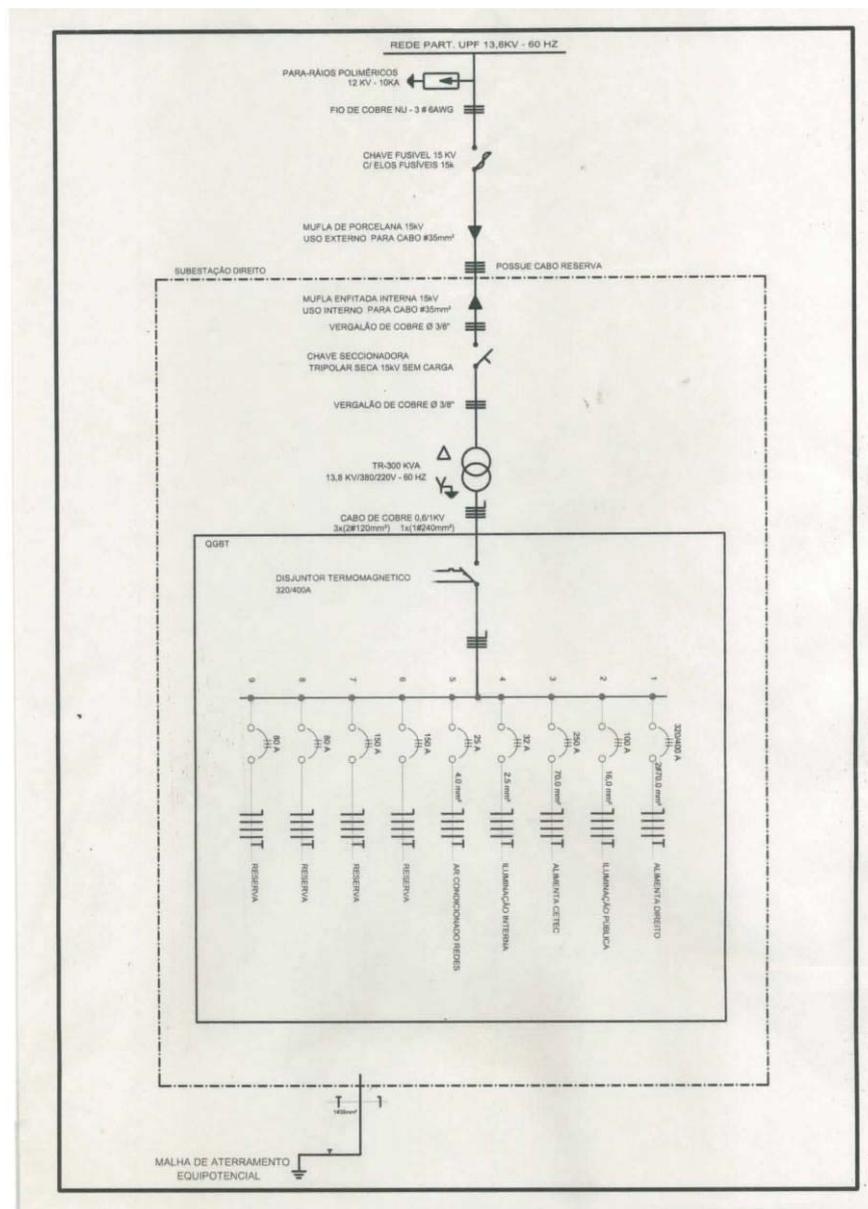
Figura 44 – Análise das harmônicas na fase T do QGBT do prédio Direito.



Fonte: Osciloscópio *Agilent Technologies*.

Verificou-se que no prédio da Faculdade de Direito as distorções harmônicas são maiores, apresentando até as frequências de 33ª ordem, isso devido as elevadas cargas existentes ligadas na rede, como fontes chaveadas, reatores, entre outras, como visto no diagrama unifilar na Figura 45. Então, partiu-se para a análise específica deste prédio e posteriormente para a construção de um protótipo de filtro passivo para corrigir os distúrbios.

Figura 45 – Diagrama Unifilar do prédio da Faculdade de Direito.



Fonte: Setor Elétrico da UPF.

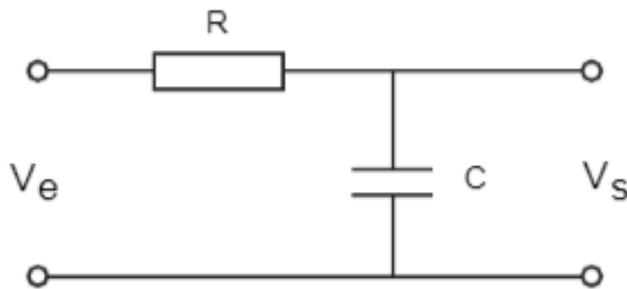
3.3 CONSTRUÇÃO DO FILTRO

Ao investigar os distúrbios existentes na rede elétrica, houve a necessidade de melhorar a qualidade da energia, para isso foi sugerido a construção de um filtro. Como o distúrbio verificado é a presença de distorções harmônicas, foi estudada a possibilidade de correção com a utilização de filtros passivos. Este filtro foi dimensionado e construído com a utilização de resistores e capacitores, o chamado filtro passivo RC passa-baixas.

3.3.1 Memorial de Cálculo

O filtro passa baixas RC série, como visto na Figura 46, permite a passagem de todas as frequências abaixo da frequência de corte (FC), rejeitando as demais.

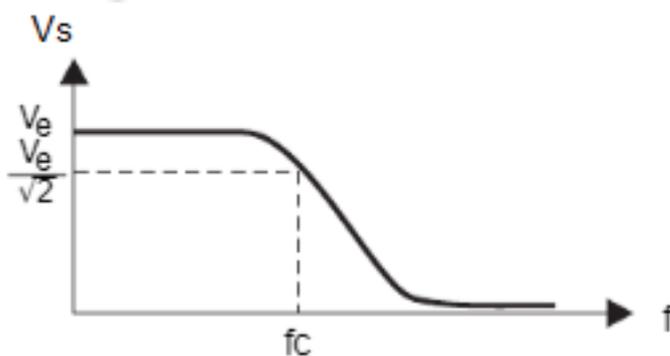
Figura 46 – Circuito RC série.



Fonte: (NILSSON E RIEDEL, 2009).

Quando obtem-se frequências baixas aplicadas na entrada do circuito, a reatância capacitiva será alta e, em consequência, a tensão V_s em cima do capacitor (C) será máxima. Logo, em baixas frequências o sinal de saída V_s terá maior amplitude, e no caso de frequências mais altas, V_s terá baixa amplitude, como visto na curva característica da tensão de saída na Figura 47.

Figura 47– Curva característica da tensão de saída de um filtro passa baixa.



Fonte: (NILSSON E RIEDEL, 2009).

As fórmulas do módulo do ganho (AV) e do módulo de fase (θ_A) do ganho de tensão dos filtros podem ser deduzidas a partir da expressão do divisor de tensão aplicada em suas saídas, como visto nas Equação 18, Equação 19 e Equação 20:

$$V_s = \frac{-jXC}{R - jXC} \cdot V_e \quad (18)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{-jXC}{R - jXC} \quad (19)$$

$$AV = \frac{XC}{\sqrt{R^2 + XC^2}} < -90^\circ + \arctg \frac{XC}{R} \quad (20)$$

Se a frequência de entrada tende a zero ($f \geq 0$), a reatância do capacitor tende a um circuito aberto ($XC \geq \infty$) e a tensão de entrada passa totalmente para a saída ($V_s \geq V_e$).

O módulo do ganho tende à unidade ($AV \geq 1$) e a fase do ganho tende a se anular ($\theta_v \geq 0^\circ$), pois a defasagem na tensão de saída é imposta apenas pelo resistor.

Se a frequência de entrada tende ao infinito ($f \geq \infty$), a reatância do capacitor tende a um curto circuito ($XC \geq 0$), de modo que o sinal de entrada fica no resistor e a tensão de saída tende a zero ($V_s \geq 0$).

O módulo do ganho tende a zero ($AV \geq 0$) e a fase do ganho tende à quadratura ($\theta_v \geq 90^\circ$), pois no Filtro Passa Baixa RC, a defasagem na tensão de saída é imposta apenas pelo atraso que o capacitor de saída provoca na tensão. Portanto, as frequências baixas passam para a saída e as altas são aterradas pelo capacitor.

Substituindo XC por $1/(2\pi RC)$, obtêm-se as expressões de módulo e ganho e fase dos seus respectivos ganhos em função dos seus dispositivos, como visto na Equação 21 e na Equação 22, respectivamente.

$$AV = \frac{1}{\sqrt{(2\pi fRC)^2 + 1}} \quad (21)$$

e

$$\theta_A = -\arctg(2\pi fRC) \quad (22)$$

No filtro passa baixa RC série é obtida a frequência de corte pelo módulo do ganho visto na Equação 23:

$$\frac{1}{\sqrt{(2\pi f_c RC)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

Na Equação 24 é vista a frequência de corte obtida:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (24)$$

As expressões gerais dos ganhos do filtro, vistas na Equação 25 e na Equação 26, são funções apenas de uma frequência f qualquer e da frequência de corte f_c , eliminando as variáveis relativas dos valores dos dispositivos.

$$AV = \frac{1}{\sqrt{\frac{f^2}{f_c^2} + 1}} \quad (25)$$

$$\theta_A = -\arctg \frac{f}{f_c} \quad (26)$$

3.3.2 Cálculo do Filtro

Inicialmente, foram coletados os dados das medições feitas no prédio do Direito com o analisador P600, depois foi feita a análise da maior ordem de distorção harmônica presente na rede, chegando a conclusão de que a 5ª ordem era a maior, como visto na Quadro 8.

Quadro 8 – Análise da maior Distorção Harmônica.

Ordem	THD (%)	Tensão (V)
1ª	4	298,56
3ª	2	6,22
5ª	2,4	7,46
7ª	1,8	5,6
9ª	0,4	1,24
11ª	0,7	2,17

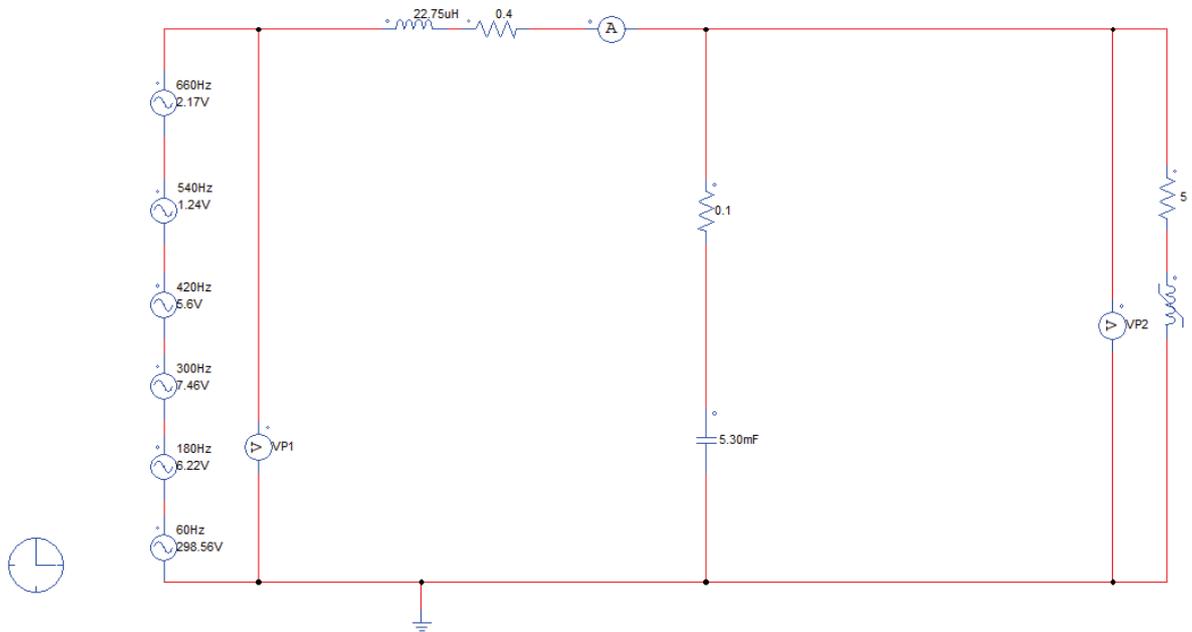
Fonte: Próprio autor.

Como a frequência na 5ª ordem de harmônica é 300 Hz, esta foi adotada como a frequência de corte do cálculo para encontrar o filtro passivo ideal. Pelo módulo do ganho, é calculado o RC, através da Equação 24, encontrando um valor de $RC = 530,51 \times 10^{-6}$.

Em seguida, foi adotado o valor de $R=0,1\Omega$, encontrando, através da Equação 24, o valor de $C=5,3 \times 10^{-3}F$.

Com este cálculo chega-se ao protótipo do filtro passivo, contendo um resistor de $0,1\Omega$ e um capacitor de $5,3mF$. O circuito foi simulado no software PSIM, como mostrado na Figura 48.

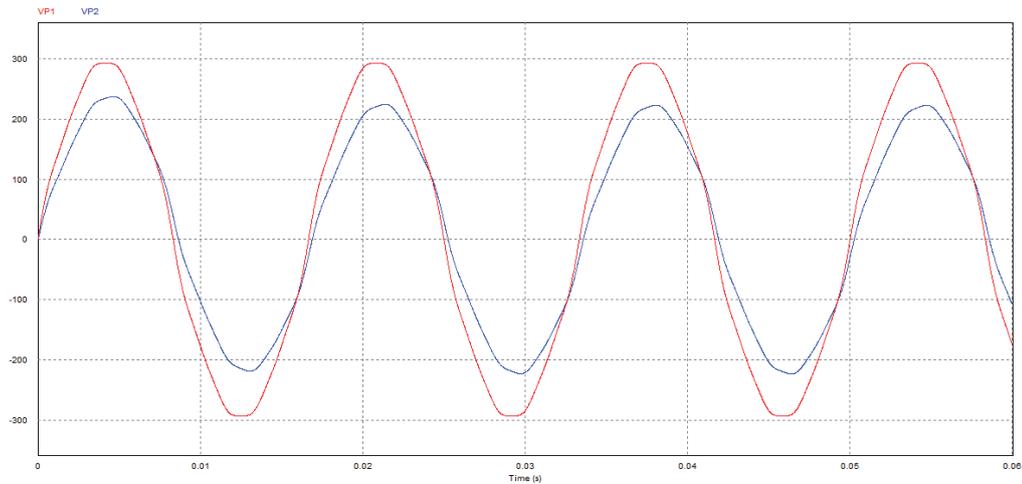
Figura 48– Simulação no software PSIM do circuito do QGBT com o filtro instalado.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 49 mostra as formas de onda da tensão na entrada (curva vermelha) e na saída (curva azul) do circuito, com filtro.

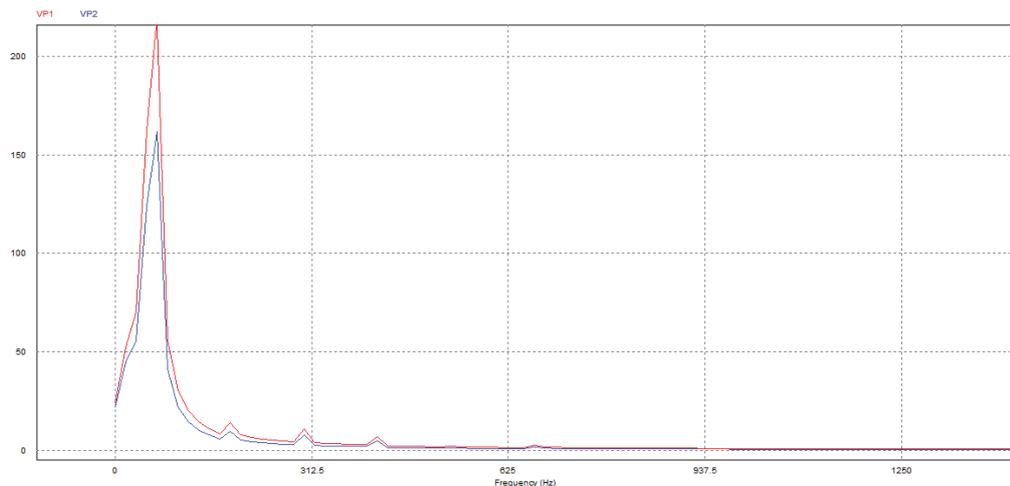
Figura 49– Simulação no software PSIM da entrada e saída da tensão.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 50 é mostrada as distorções harmônicas da tensão na entrada (curva vermelha) e na saída do circuito (curva azul), onde se percebe a ação do filtro.

Figura 50– Simulação no software PSIM da distorção harmônica na entrada e na saída da tensão.

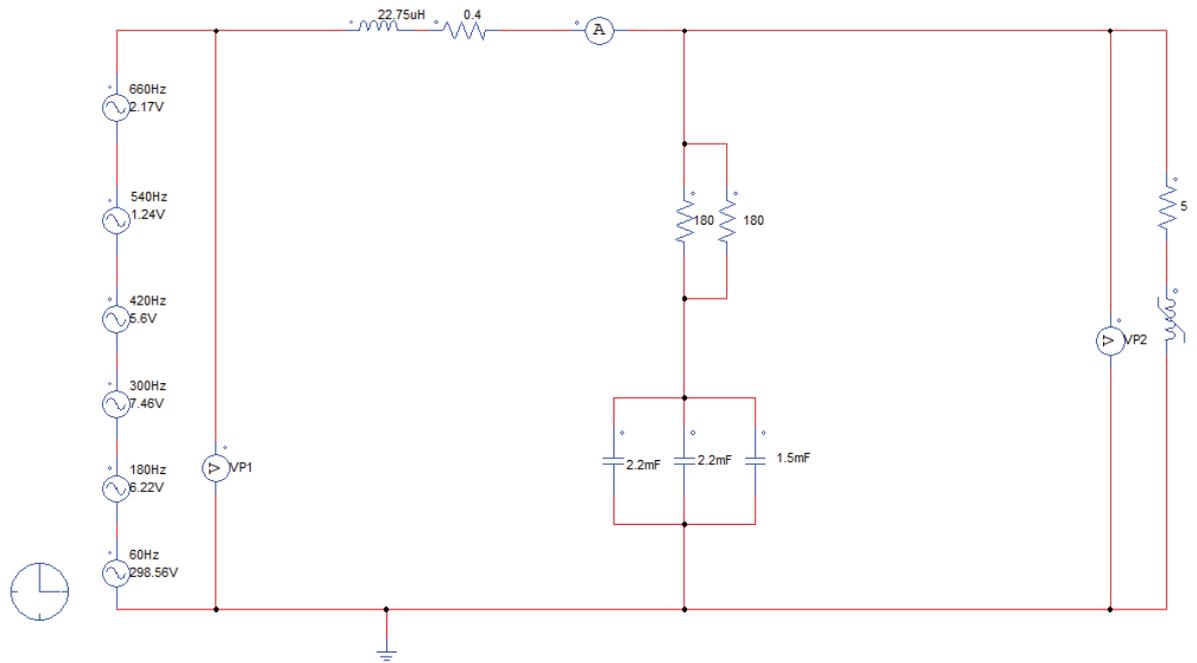


Fonte: Próprio autor.

Como os cálculos resultaram em um valor elevado de capacitor e o mesmo não está disponível no almoxarifado da Engenharia Elétrica da UPF, e também, devido à dificuldade de aquisição dos componentes pelo elevado custo, optou-se por simular no software PSIM a fim de obter análise dos resultados com os valores de componentes disponíveis no almoxarifado.

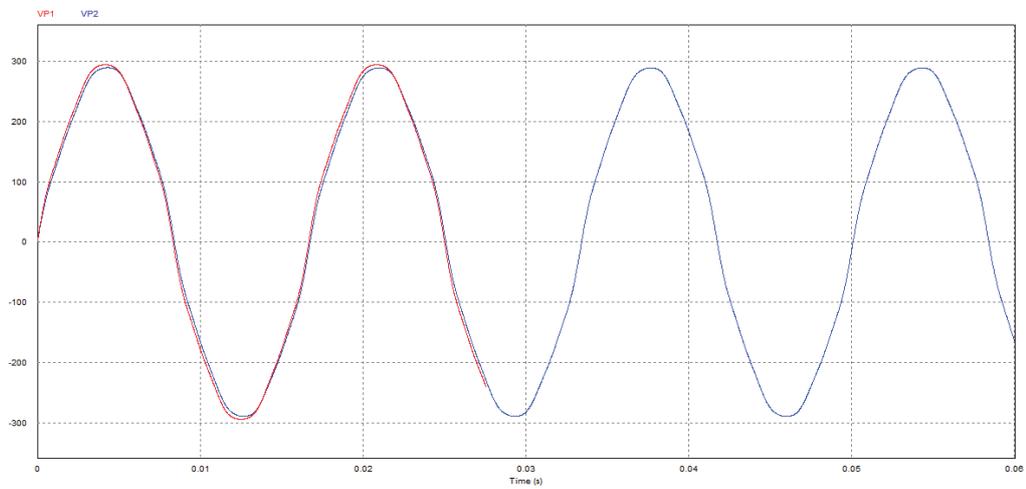
Para o segundo protótipo calculado com os componentes disponíveis no almoxarifado, foi utilizado dois resistores em paralelo de $180\Omega/50W$ e 3 capacitores em paralelo, dois de $2,2\mu F/400V$ e um de $1,5\mu F/400V$, é visto na Figura 51. A Figura 52 mostra a forma de onda da tensão na entrada e na saída do segundo filtro projetado e na Figura 53 as distorções harmônicas do circuito.

Figura 51– Simulação no software PSIM do circuito do QGBT com o segundo filtro instalado.



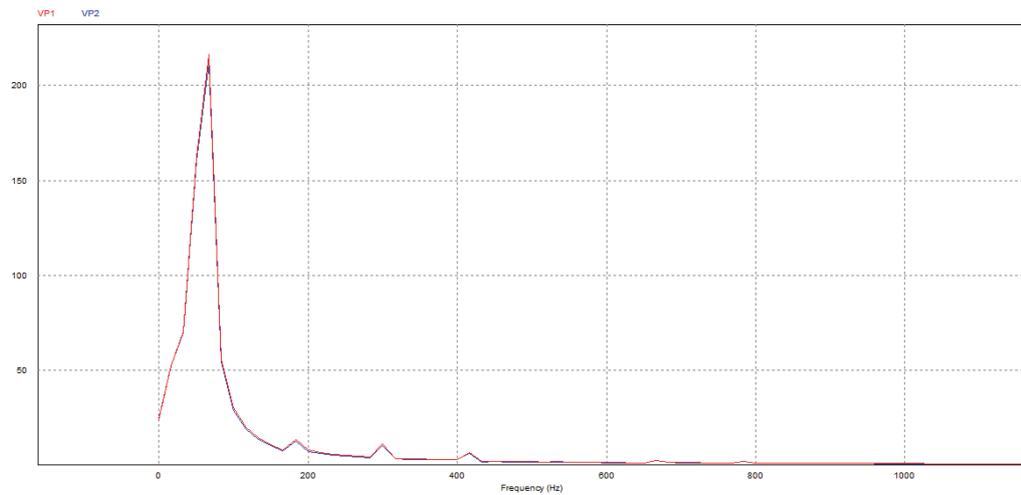
Fonte: Próprio autor.

Figura 52– Simulação no software PSIM da entrada e da saída da tensão.



Fonte: Próprio autor.

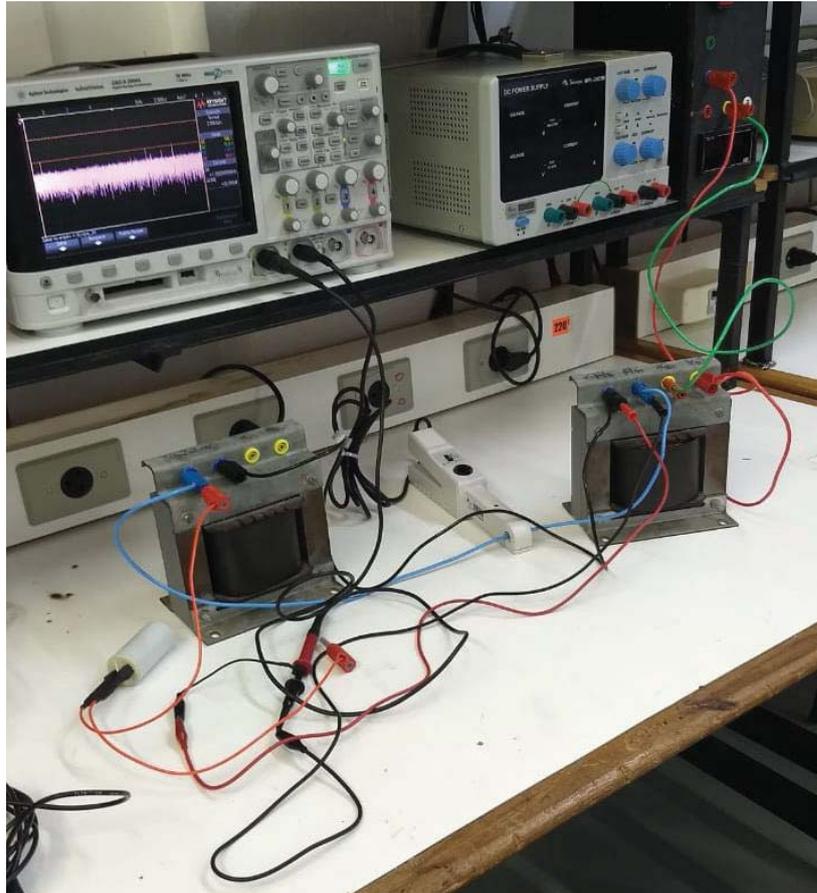
Figura 53– Simulação no software PSIM da distorção harmônica na entrada e na saída da tensão.



Fonte: Próprio autor.

Como este filtro não trouxe efeitos significativos no QGBT do prédio do Direito, optou-se por testes realizados em bancada de laboratório (Figura 54). Para isso, utilizou-se um Regulador de Tensão Alternada (VARIAC) que fornecia a tensão, dois transformadores de 550VA, sendo que um deles utilizado como carga indutiva e um capacitor de 3 μ F conectado na saída, em paralelo com a carga para melhorar o fator de potência.

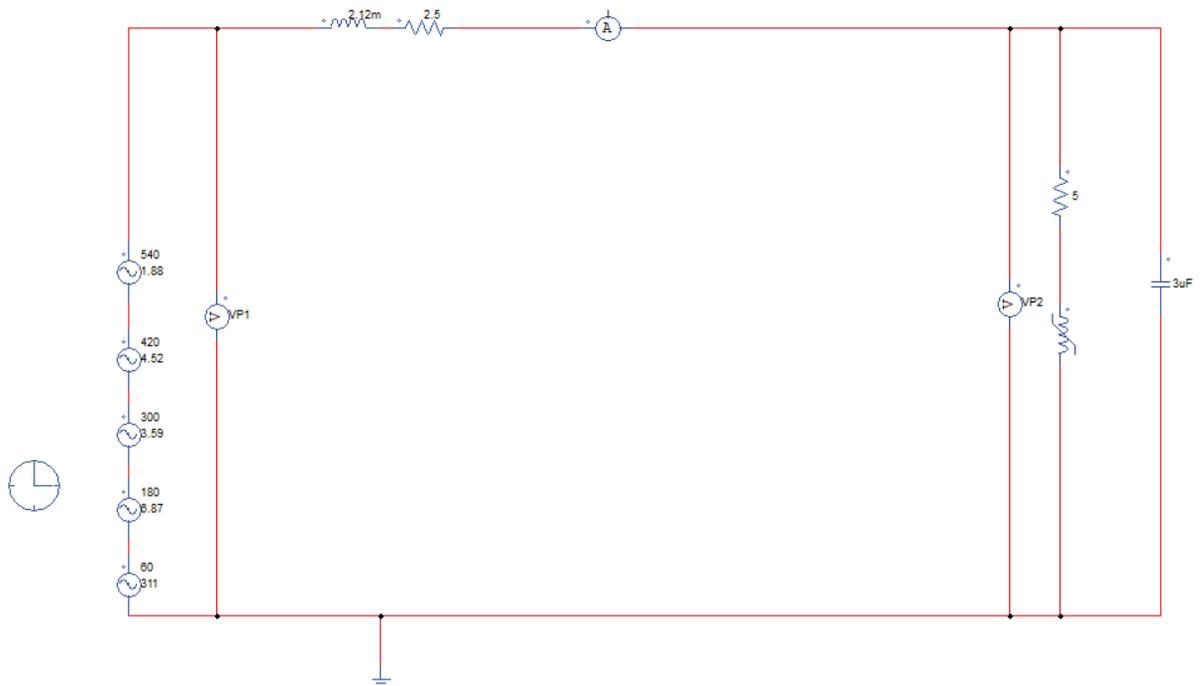
Figura 54– Simulação em bancada de laboratório.



Fonte: Próprio autor.

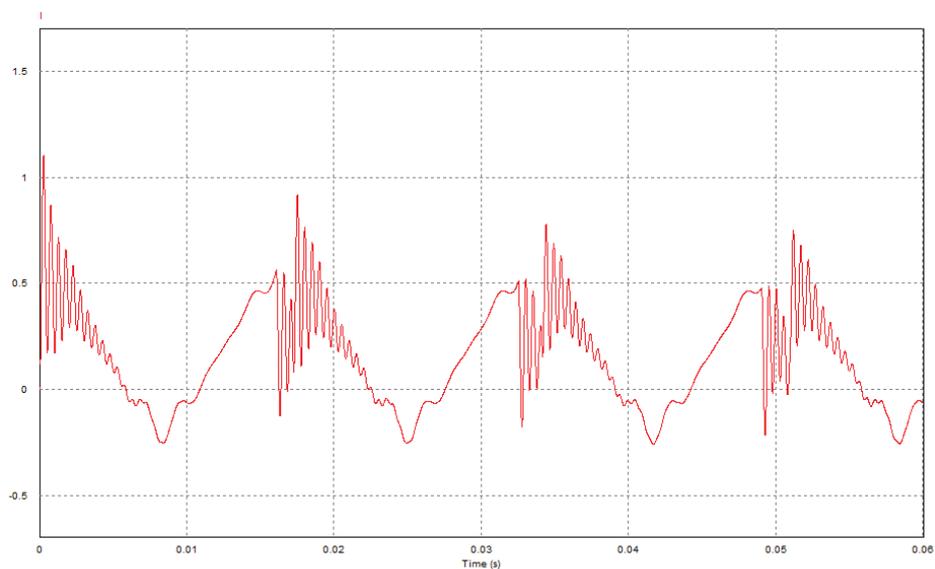
Para análise da qualidade da energia foi utilizado um osciloscópio, em uma das suas entradas estavam ligadas uma ponteira de corrente e na outra uma ponteira simples. Desta forma, obtém-se distorções harmônicas de tensão e corrente. A distorção harmônica de corrente demonstrou ser maior, por isso foi feita simulação no *software* PSIM analisando apenas a forma de onda da corrente. Na Figura 55 temos o a simulação no *software* PSIM do circuito montado na bancada e na Figura 56 a forma de onda da corrente com as distorções harmônicas.

Figura 55– Simulação no *software* PSIM do circuito montado na bancada.



Fonte: Próprio autor.

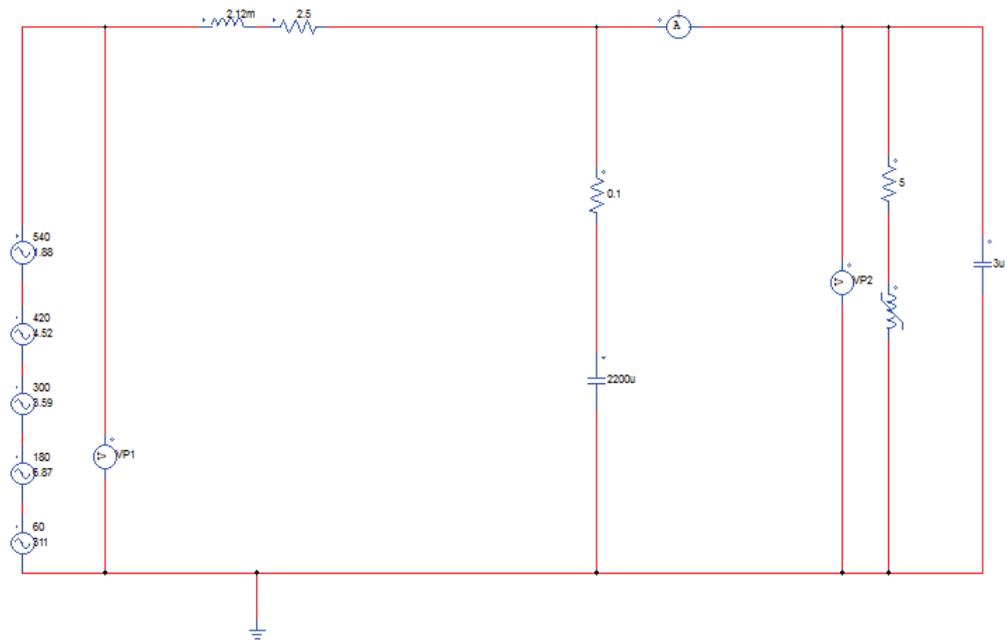
Figura 56– Forma de onda da corrente com as distorções harmônicas vista no *software* PSIM.



Fonte: Próprio autor.

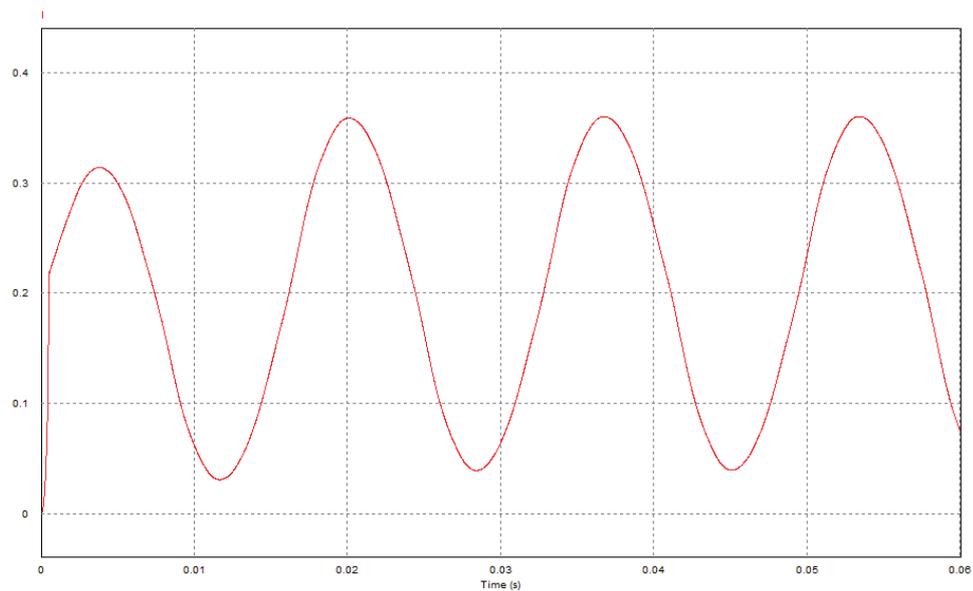
O filtro ideal para a simulação em bancada do laboratório é visto na Figura 57, contendo um capacitor de 2200uF e um resistor de 0,1Ω, com uma frequência de corte de 723Hz, isso, refere-se a 11^a ordem. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 58.

Figura 57– Simulação no *software* PSIM do circuito montado na bancada com o filtro ideal.



Fonte: Próprio autor.

Figura 58– Forma de onda da corrente com o filtro ideal vista no *software* PSIM.



Fonte: Próprio autor.

O filtro projetado para o teste na bancada do laboratório utilizou de um reostato de potência máxima igual a 1250W posicionado em 39Ω e dois capacitores de 15uF ligados em paralelo. O

teste em bancada resultou na Figura 59. Foi utilizado o reostato de potência máxima, devido a potência dissipada exigida ser elevada e pela corrente máxima limitada pelo VARIAC.

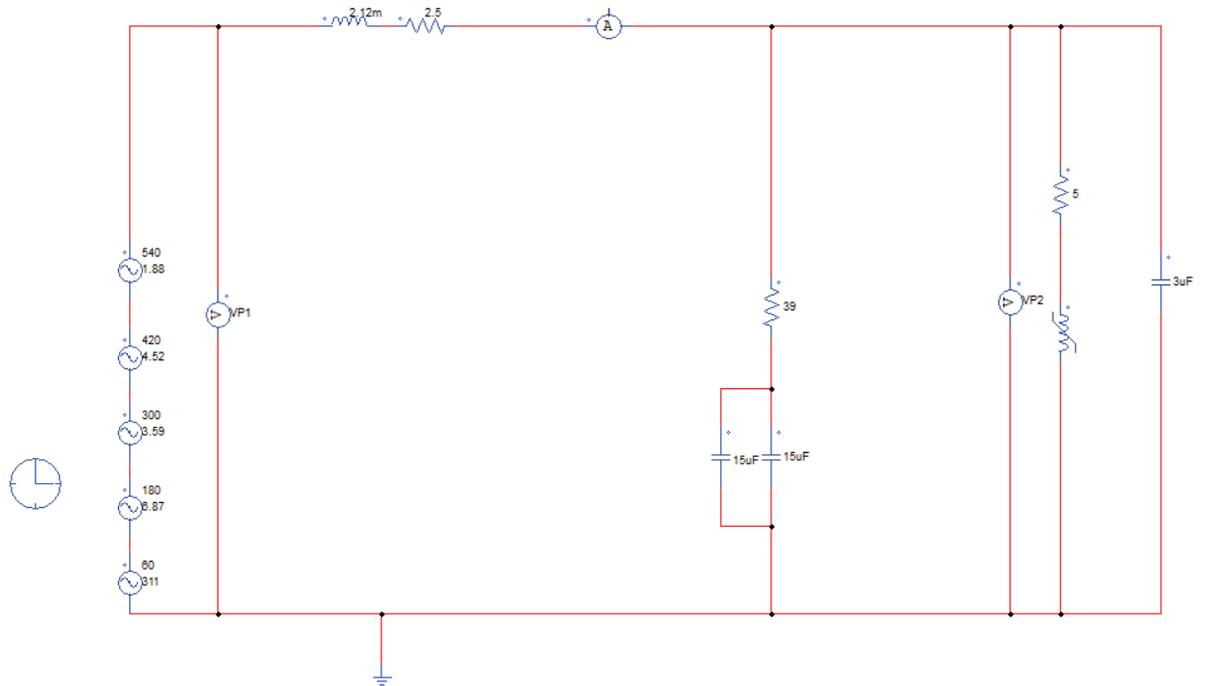
Figura 59– Teste do filtro realizado em bancada de laboratório.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 60 mostra a simulação no *software* PSIM do circuito com o filtro desenvolvido com os componentes disponíveis no almoxarifado do curso.

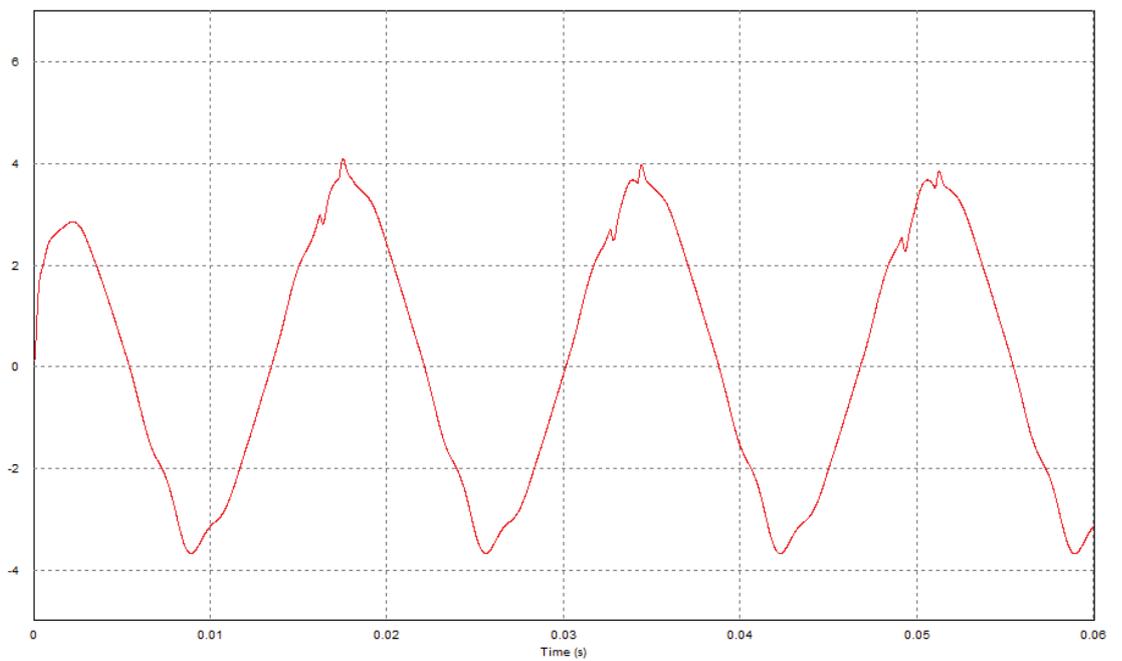
Figura 60– Simulação no *software* PSIM do circuito com filtro.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 61 temos a forma de onda da corrente encontrada com a utilização do filtro RC série projetado.

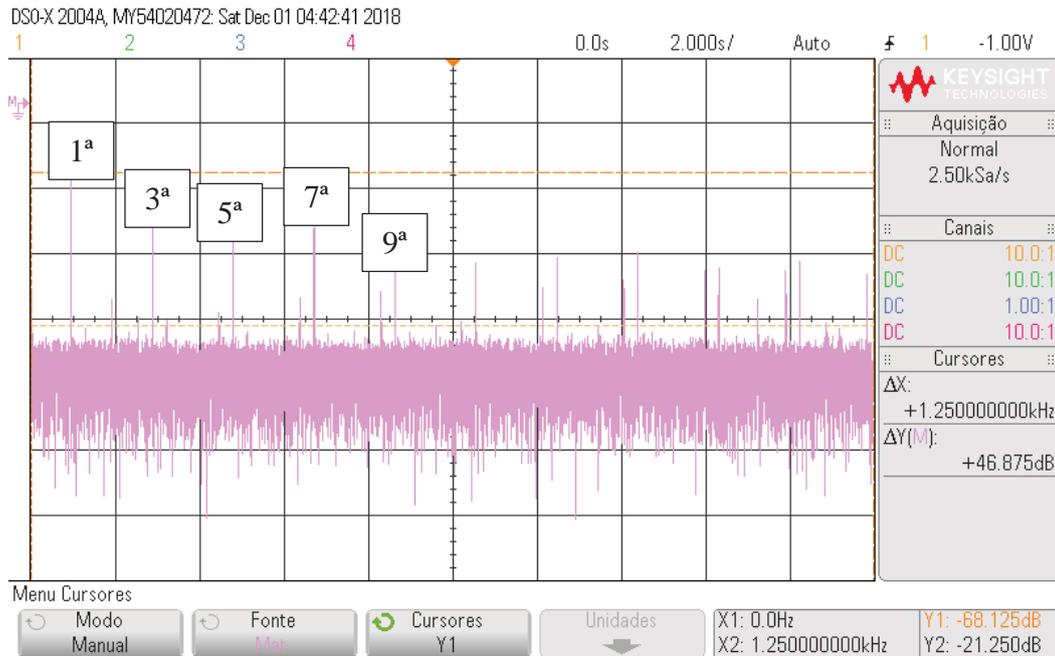
Figura 61– Forma de onda da corrente encontrada com a utilização do filtro RC série projetado.



Fonte: Próprio autor.

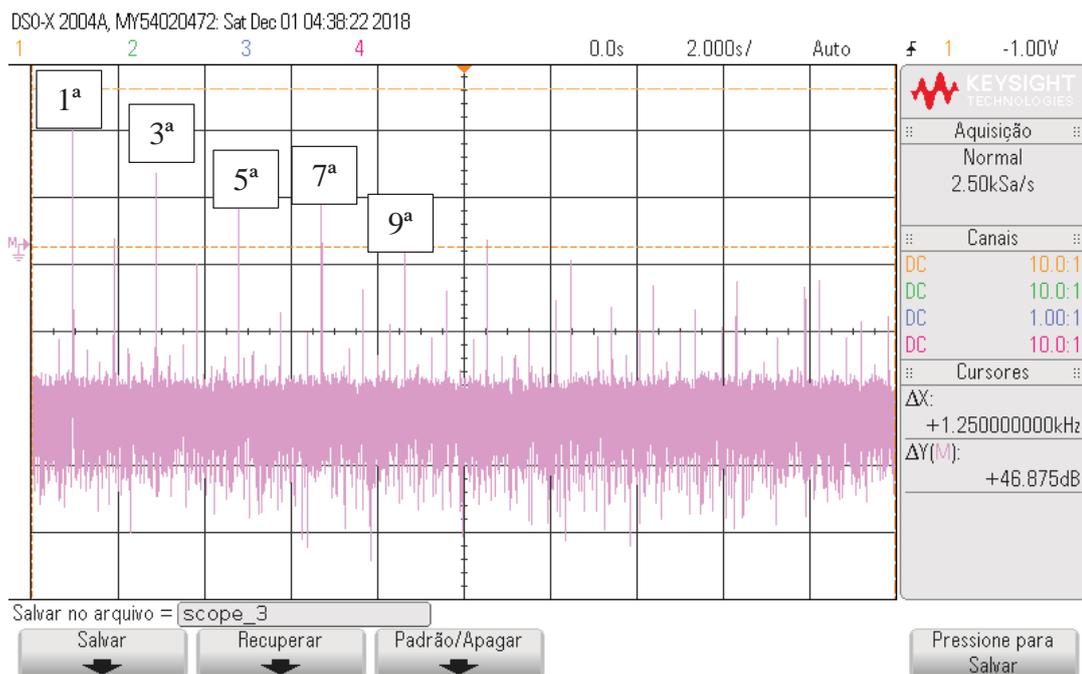
As análises das distorções harmônicas foram investigadas pelo osciloscópio. Primeiramente foi feita a análise da corrente e da tensão sem o uso do filtro, como visto na Figura 62 e na Figura 63, respectivamente.

Figura 62– Distorção harmônica da corrente sem o uso do filtro.



Fonte: Próprio autor.

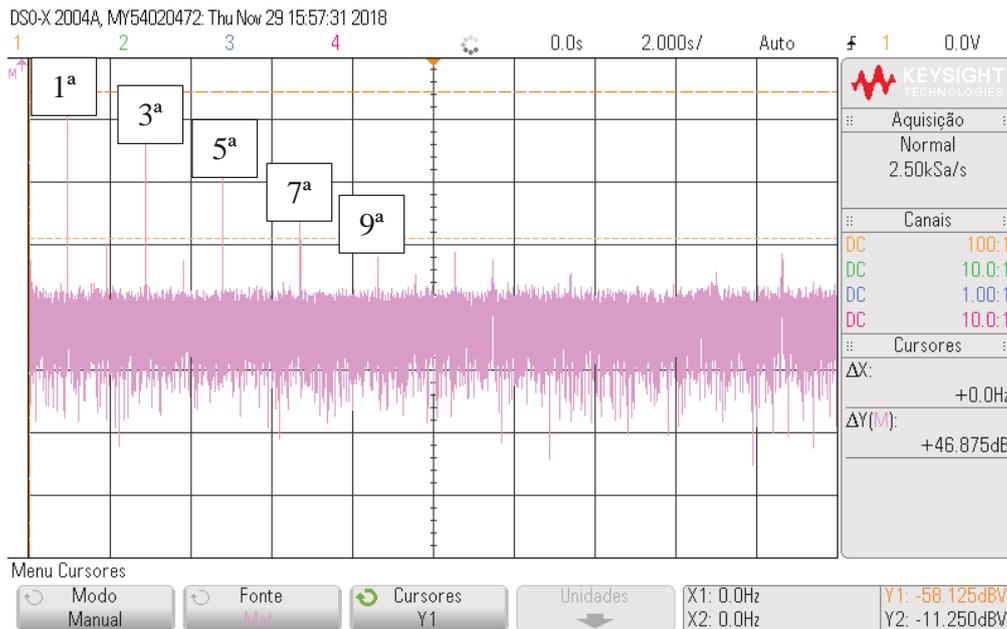
Figura 63– Distorção harmônica da tensão sem o uso do filtro.



Fonte: Próprio autor.

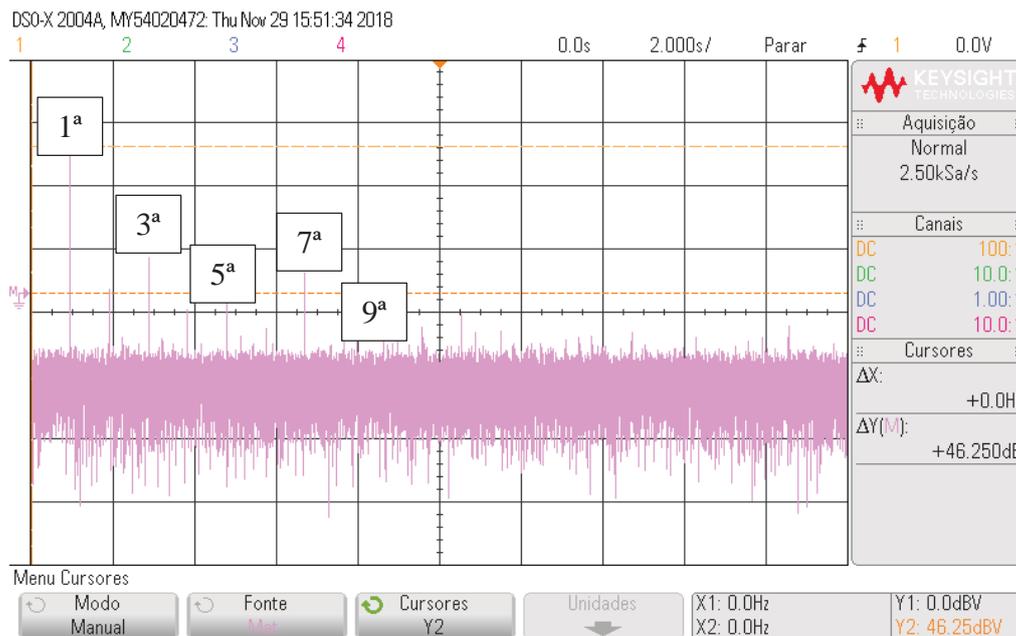
Depois disso, foi feita a análise das distorções harmônicas com a utilização do filtro, como visto na Figura 64 e na Figura 65, respectivamente.

Figura 64– Distorção harmônica da corrente com o uso do filtro.



Fonte: Próprio autor.

Figura 65– Distorção harmônica da tensão com o uso do filtro.



Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados todos os resultados obtidos com a montagem do protótipo, os quais apresentaram resultados satisfatórios, embora não tenham eliminado toda a distorção harmônica.

4.1 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

O objetivo principal do trabalho era a análise da energia injetada por painéis fotovoltaicos em redes de distribuição de baixa tensão da UPF, com a finalidade de identificar possíveis distúrbios na qualidade de energia elétrica. Como resultado, identificou-se a presença de distorções harmônicas de tensão e corrente. Aprofundando-se na análise percebeu-se que estas distorções harmônicas eram originadas pela característica da carga elétrica ligada à rede de distribuição.

Então, desenvolveu-se um protótipo de filtro passivo para correção dos distúrbios, porém os componentes calculados para esta redução não estavam disponíveis no almoxarifado, e devido ao elevado custo desses materiais e a indisponibilidade no mercado, foi desconsiderada a hipótese da construção deste protótipo. Para validar o trabalho, foi feita uma simulação de carga com distorções harmônicas em bancada de laboratório e, posteriormente, simulação no *software* PSIM para determinar os componentes para construção de um filtro passivo com materiais disponíveis no almoxarifado.

4.2 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Durante o teste realizado na bancada do laboratório verificou-se que as perturbações harmônicas estão presentes em maior quantidade na forma de onda da corrente e, desta forma, foi feita a simulação no *software* PSIM com a inserção do filtro passivo analisando apenas esta forma de onda para correção dos distúrbios existentes.

O filtro passivo instalado em paralelo com a carga apresentou bons resultados, porém não suficientes para eliminar totalmente as distorções harmônicas presentes na rede elétrica que

afetavam a qualidade da energia. Os componentes disponíveis tinham capacidade limitada, então não foi possível utilizar os componentes calculados idealmente.

Os resultados obtidos são vistos no Quadro 9.

Quadro 9– Análise das distorções harmônicas com e sem o uso filtro em (dB).

	Ordem	1ª	3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	17ª	19ª	21ª
Tensão	Sem Filtro	46.875 dB	22 dB	10 dB	13 dB	5 dB	2 dB					
	Com Filtro	46.875 dB	12 dB	0 dB	8 dB	0 dB	0 dB					
Corrente	Sem Filtro	46.875 dB	40 dB	23 dB	30 dB	21 dB	18 dB	19 dB	20 dB	17 dB	18 dB	15 dB
	Com Filtro	46.875 dB	36 dB	21 dB	10 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB

Fonte: Próprio autor.

Como visto no Quadro 9, na forma de onda da tensão o filtro reduziu as harmônicas desde a 3ª ordem, deixando abaixo de 0 dB a partir da 9ª ordem, isso significa que estas harmônicas são menores que 1V. Na Equação 27 é apresentado a transformação de dB (medido) para V (medido).

$$V(\text{medido}) = 10^{\frac{dB(\text{medido})}{20}} \quad (27)$$

Na forma de onda da corrente foi visto que as distorções harmônicas também diminuiram a partir da 3ª ordem, e que depois da 9ª ordem são menores que 1V.

Os resultados adquiridos foram aceitáveis em relação ao material utilizado, pois o filtro passivo foi projetado para redução de distorções harmônicas de ordem 5 e as menores não eram reduzidas significativamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente foi apresentado um estudo para contextualizar e dar suporte teórico a proposição deste trabalho, que é a construção de filtros para melhorar a qualidade da energia elétrica em redes de distribuição com geração distribuída fotovoltaica.

Através da revisão bibliográfica foi possível compreender o funcionamento de um sistema de geração fotovoltaica e os distúrbios que afetam a qualidade da energia. Também, pode-se entender como funciona um analisador de energia.

Não foi possível instalar o filtro na carga onde foram identificadas as distorções harmônicas devido ao fato de que os componentes necessários não estavam disponíveis no almoxarifado da UPF. Desta forma, foi desenvolvido um filtro com componentes disponíveis e feita a análise dos resultados em bancada de laboratório.

A análise dos resultados mostrou que o uso do filtro passivo é uma solução aceitável para a correção de distorções harmônicas, porém, possui várias limitações para a utilização em grandes cargas onde seus componentes necessitam de valores elevados, o que dificulta a sua aquisição, seja por disponibilidade no mercado ou pelo elevado custo. Outra limitação do filtro passivo é que ele somente corrigirá a distorção harmônica para as condições encontradas no seu desenvolvimento, não sendo flexível a sua utilização. Nestes casos o mais indicado seria o filtro ativo.

6 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestão para desenvolvimento de trabalhos futuros, indica-se:

- Realizar estudo para os demais distúrbios elétricos que possam ser provocados pela geração distribuída, tais como: Baixo Fator de Potência, Desequilíbrio da Tensão, Flutuação de Tensão e VTDC;
- Desenvolver um filtro ativo para a correção das distorções harmônicas.

7 REFERÊNCIAS

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2018.

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída**, Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, 2016.

ARAÚJO, Rômulo D. **Projeto e Simulação de Filtros L e LCL para Interconexão de Inversor NPC Trifásico à Rede**. 2012. Trabalho de Mestrado (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BALFOUR, John; SHAW, Michael; NASH, Nicole Bremer. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

BRADSHAW, A. B.; **Filtros: Teoria e Prática**, Revista Elektor Eletrônica número 16, novembro 1987, pp. 14-20.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

KASSICK, Enio V. **Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

LEÃO, Ruth P. S.; SAMPAIO, Raimundo F.; ANTUNES, Fernando L. M. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

MARTINS, Danizar C.; BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência: introdução ao estudo dos conversores CC-CA**. 2. ed. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2008.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan. **Circuitos Elétricos**. 8. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

OLIVEIRA, Wagner J. N. **Projeto de Filtros Passivos para a Redução de Correntes Harmônicas na Subestação de 2x300kVA da Estação Elevatória de Água do Jiqui**. 2015. Trabalho de Mestrado (Mestre em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos aplicações e laboratório**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

ROCHA, Joaquim E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Curitiba: Universidade Tecnológica do Paraná – Departamento de Eletrotécnica, 2016.

SIGNOR, Felipe. **Estudo e Desenvolvimento de um Filtro Ativo de Potência Híbrido sem Transformador**. 2016. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceito e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

ZAMPIERON, Mayelen. **Análise da Viabilidade no uso de Sistema Fotovoltaico como Fonte de Energia Alternativa em uma Empresa Metalúrgica**. 2017. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.