

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

ALESSANDRO SILVEIRA DORNELES

**ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA SUBESTAÇÃO DE UMA
INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA E PROJETO DE FILTRO PARA REDUÇÃO DO
EFEITO HARMÔNICO**

São Leopoldo
2019

ALESSANDRO SILVEIRA DORNELES

**ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA SUBESTAÇÃO DE UMA
INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA E PROJETO DE FILTRO PARA REDUÇÃO DO
EFEITO HARMÔNICO**

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

Orientador: Prof. M.e Vinícius André Uberti

São Leopoldo

2019

AGRADECIMENTOS

Ao longo desses 10 anos de dedicados estudos, preciso agradecer a muitas pessoas que acreditaram em mim, que fizeram com que eu não desistisse, mas a vida às vezes acaba nos afastando, por vezes por apenas algum tempo. Quero agradecer ao amigo e chefe Almir Silva que me incentivou a sempre estudar, ao também chefe, e porque não mentor, Nogueira que acreditou no meu potencial e apostou sempre muito forte em mim, aos colegas de faculdade que me ajudaram de alguma maneira a chegar até aqui.

Aos professores, esses sim desde o ensino fundamental até o ensino superior, gostaria de agradecer a todos, pela minha formação e pela paciência em nos ensinar, entre todos gostaria de agradecer em especial o Dr. Paulo Pereira pela paciência e dedicação e ao meu orientador que com muita dedicação e sabedoria me passou muito conhecimento e me ajudou muito nessa etapa do curso, M.e Vinícius Uberti, obrigado.

Agradecer aos meus pais que me fizeram um cidadão do bem, minha mãe querida que sempre me ensinou a ser humilde e justo, ao meu amado pai que me ensinou simplesmente como é a vida, naquele tempo talvez isso era o mais difícil.

Agradeço a minha tia Geo que sempre me teve como um filho e ao seu esposo, o sempre amado Tio Vilmar, que esta em algum lugar do céu muito feliz hoje.

Agradeço a minha amada irmã que sempre esteve ao meu lado, e hoje serve de exemplo para mim.

E agora o mais difícil, pois as lágrimas já escorrem ao meu rosto. Agradeço muito aos meus filhos Amanda e Lucas, filhos esta acabando e o pai vai poder estar em casa à noite e não vai precisar mais passar os finais de semana estudando, o pai esta se formando meus amores, vamos aproveitar muito juntos.

Agradeço muito especial a minha amada esposa Daniele que segurou essa barra de praticamente criar as crianças sozinha, pois sempre ou estava em aula ou estava estudando, obrigado meu amor eu te amo.

E por fim, agradeço a Deus por ter me dado forças para chegar até aqui e não ter me deixado desistir nos momentos de fraqueza, e não foram poucos.

RESUMO

Com o avanço tecnológico da indústria e a expansão do consumo de energia elétrica, cresceu a quantidade e a variedade de cargas não lineares presentes no meio industrial. Uma característica relevante deste tipo de carga é a geração de frequências harmônicas, que se propagam a outros pontos da instalação. Para os efeitos harmônicos de tensão gerados pelas cargas não lineares, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece, através do módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição), limites máximos específicos, metodologia de medição, valores de referência, entre outros. Para as distorções harmônicas de corrente, tanto individual quanto total, a norma técnica internacional IEEE 519:2004 frequentemente é utilizada como referência. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo de qualidade de energia em uma subestação de uma indústria alimentícia localizada em Porto Alegre, RS, a qual sofre com constante queima de equipamentos sem causas aparentes e outros problemas relacionados à qualidade da energia elétrica. Foram analisados os valores reais das distorções harmônicas a partir de levantamento em campo, a partir da qual foi proposta uma alternativa técnica para reduzir os níveis de distorções harmônicas a valores abaixo dos limites estabelecidos pelos documentos de referência. Para atingir plenamente o objetivo proposto, a metodologia aplicada resultou no projeto de filtros passivos com frequência ressonante adequada à frequência das distorções harmônicas excedidas. Através da simulação da carga modelada e aplicação dos filtros projetados, no software PSIM, obteve-se uma considerável redução da distorção harmônica total de corrente de 22,29% para 5,19%, ou seja, dentro dos limites especificados na IEEE 519.

Palavras-chaves: Distorção Harmônica. Filtros passivos. PRODIST Módulo 8. IEEE 519.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formato da onda senoidal versus distúrbio	17
Figura 2 – Diagrama simplificado interação sistema carga	19
Figura 3 – Representação da decomposição de um sinal distorcido	21
Figura 4 – Fundamental e a resultante das diversas ordens harmônicas	22
Figura 5 – Tensão distorcida por um décimo de terceiro harmônico.....	27
Figura 6 – Tensão distorcida por um décimo de quinto harmônico	27
Figura 7 – Classificação das cargas.....	30
Figura 8 – Circuito elétrico com componentes passivos lineares.....	31
Figura 9 – Cargas lineares: (a) puramente resistivas (b) associação RLC	32
Figura 10 – a) Interruptores b) ondas não senoidais geradas	33
Figura 11 – Dispositivo de controle da corrente e da tensão na carga.....	34
Figura 12 – Formas de onda: (a) Tensão de alimentação; (b) Corrente distorcida da carga; (c) Tensão distorcida da carga.	34
Figura 13 – Filtro ligado em série	36
Figura 14 – Filtro ligado em paralelo	36
Figura 15 – Conexão ativa serie de tensão.....	37
Figura 16 – Conexão ativa paralela da corrente.....	38
Figura 17 – Fluxograma adotado para elaboração do projeto.....	39
Figura 18 – Diagrama Unifilar da Subestação Analisada	41
Figura 19 – Local da instalação do Analisador de Energia	42
Figura 20 – Cargas não lineares	43
Figura 21 – Filtro de Sintonia Simples Instalado em paralelo a Carga.....	48
Figura 22 – Filtro de Sintonia Instalado Centralizado.....	48
Figura 23 – SE 03	51
Figura 24 – Instalação do analisador de energia.....	52
Figura 25 – Ligação do medidor no barramento.....	53
Figura 26 – Analisador de Energia em operação	54
Figura 27 – Gráfico da THDV	58
Figura 28 – Gráfico da THDi	60
Figura 29 – Sistema Modelado.....	64
Figura 30 – Simulação do Sistema Modelado com Amplitude da Tensão e Corrente	65

Figura 31 – Simulação do Sistema Modelado do Fator de Potência.....	66
Figura 33 – Simulação do Sistema Modelado da Potência Aparente.....	67
Figura 34 – Simulação do Sistema Modelado da Distorção Harmônica Total da Corrente	68
Figura 35 – Gráfico do espectro harmônico da carga modelada.....	70
Figura 36 – Modelagem do sistema com filtro de 3 ^o Ordem.....	71
Figura 37 – Espectro com e sem filtro de 3 ^a harmônica.....	72
Figura 38 – Modelagem do sistema com filtro de 5 ^a Ordem.....	73
Figura 39 – Espectro com filtro de 5 ^o harmônica.....	74
Figura 40 – Modelagem do sistema com filtro de 7 ^a Ordem.....	75
Figura 41 – Espectro com filtro de 7 ^a harmônica.....	76
Figura 42 – Modelagem do sistema com filtro de 11 ^a Ordem.....	77
Figura 43 – Espectro com filtro de 11 ^a harmônica.....	78
Figura 44 – Comparação entre as formas de onda na fundamental	79
Figura 45 – Evolução da redução da THDi	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Distúrbios elétricos na categoria eventos	17
Quadro 2 – Distúrbios elétricos sustentados	18
Quadro 3 – Interações sistemas-cargas-sistemas	19
Quadro 4 – Componentes espectrais de formas de onda de frequência f	20
Quadro 5 – Grandezas e símbolos aplicáveis à formulação das harmônicas	23
Quadro 6 – Referência para distorções harmônicas máxima de tensão	24
Quadro 7 – Limites para distorções harmônicas individuais.....	24
Quadro 8 – Limites das distorções harmônicas de corrente em uma tensão de 120 V a 69.000 V	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Siglas do Relatório	55
Tabela 2 – Tensão de Fase.....	55
Tabela 3 – Corrente de Fase.....	56
Tabela 4 – Potência Aparente	56
Tabela 5 - Potência Ativa	56
Tabela 6 – Potência Reativa	57
Tabela 7 – Fator de Potência	57
Tabela 8 – Distorção Harmônico Total de Tensão	58
Tabela 9 – Distorção individual de harmônico de tensão	59
Tabela 10 – Distorção Harmônico Total de Corrente	61
Tabela 11 – Distorção individual de harmônico de Corrente	62
Tabela 12 – Parâmetros Extraídos do relatório	63
Tabela 13 – Comparação entre valores reais e simulados de Tensão e Corrente	65
Tabela 14 – Comparação entre valores reais e simulados de FP, P e S.	67
Tabela 15 – Comparação entre valores reais e simulados de THDi	68
Tabela 16 – Comparação Geral dos Valores Reais e Simulados.....	69
Tabela 17 – Valores simulados para filtro de 3 ^o ordem	71
Tabela 18 – Valores do filtro de 5 ^a ordem	73
Tabela 19 – Valores simulados para filtro de 5 ^a ordem	73
Tabela 20 – Valores do filtro de 7 ^a ordem	75
Tabela 21 – Valores simulados para filtro de 7 ^a ordem	75
Tabela 22 – Valores do filtro de 11 ^a ordem	77
Tabela 23 – Valores simulados para filtro de 11 ^a ordem	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa.....	12
1.2 Objetivo	13
1.2.1 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Qualidade da energia	14
2.1.1 Distúrbios que afetam a qualidade da energia	15
2.2 Distorção harmônica.....	19
2.3 Regulamentação e normas para harmônicas	22
2.4 Efeito harmônico	25
2.5 Caracterização das perturbações	29
2.6 Principais fontes de harmônicos	30
2.6.1 Cargas lineares	31
2.6.2 Cargas não lineares	32
2.7 Filtros de harmônicos	35
2.7.1 Filtros passivos.....	35
2.7.2 Filtros ativos	37
2.8 Considerações finais	38
3 METODOLOGIA	39
3.1 Apresentação geral	39
3.2 Dados e parâmetros elétricos do sistema modelado.....	40
3.3 Escolha da subestação.....	40
3.4 Definição dos tempos de amostragem.....	41
3.5 Coleta e análise dos dados	42
3.6 Modelagem do sistema e ferramenta de análise	43
3.7 Modelagem do filtro	45
3.7.1 Local de instalação dos filtros	47
4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS ..	50
4.1 Escolha da subestação, período de amostragem e coleta de dados	50
4.2 Análise dos dados do relatório de qualidade	54
4.2.1 Análise distorção harmônica de tensão.....	57
4.2.2 Análise da distorção harmônica de corrente	60

4.3 Modelagem do sistema	63
4.4 Simulação do sistema modelado	64
4.5 Projeto e simulação para filtro de distorção harmônica de corrente	69
4.5.1 Cálculo do filtro para harmônica de 3ª ordem	70
4.5.2 Cálculo do filtro para harmônica de 5ª ordem	72
4.5.3 Cálculo do filtro para harmônica de 7ª ordem	74
4.5.4 Cálculo do filtro para harmônica de 11ª ordem	76
5. CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia empregada na indústria fez crescer a utilização de cargas não lineares, grandes geradoras de distorções harmônicas. Da mesma forma, o crescimento e o desenvolvimento das cargas não lineares residenciais também contribuíram para o crescimento dos distúrbios harmônicos.

A presença de harmônicos em um sistema de potência pode acarretar uma série de efeitos indesejados, como o aparecimento de vibrações e ruídos em motores de indução, sobreaquecimento de núcleos de ferro magnéticos, sobreaquecimento de capacitores, erro de medição de grandezas elétricas, erro de atuação de proteções, sobrecorrente do neutro, queima de equipamentos eletrônicos sensíveis, entre outros.

No Brasil, o órgão responsável por realizar a fiscalização e regulamentar o setor elétrico é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que, através do Procedimento de Distribuição (PRODIST), em seu Módulo 8, determina os parâmetros de qualidade para os serviços e o produto energia elétrica.

Apesar de haver um órgão nacional que estabelece parâmetros de qualidade, os distúrbios relacionados à energia elétrica ainda afetam diretamente o rendimento de muitas empresas, provocando prejuízos e redução de produtividade.

A empresa em que será realizado o projeto apresentado neste trabalho é do ramo alimentício, líder do mercado de refrigerantes, com produção anual de 533.732.000 de litros de refrigerantes por ano, apenas na unidade de Porto Alegre. Seu crescimento anual de produção é de 5%.

Nas instalações dessa unidade, há oito subestações, sendo a principal alimentada em 69/13,8 kV. As outras sete subestações são de 13,8 kV/380 V. As subestações são divididas e nomeadas por números, recebendo, a principal, a nomenclatura de 69. As demais são nomeadas de SE 01 a SE 07. Apenas as subestações SE 02 e SE 05 são destinadas às áreas administrativas; as demais ficam distribuídas no parque industrial.

A subestação SE 01 alimenta parte do setor de utilidades, mais especificamente, onde ficam os compressores de ar comprimido de baixa pressão e iluminação da planta. A maior parte dos equipamentos do setor de utilidades é alimentada pela subestação SE 06, destinada aos compressores de refrigeração, caldeira e torres de resfriamento. A subestação SE 04 fica localizada na área de

sopro. Sua carga é composta por compressores de ar comprimido de alta pressão, sopradoras de garrafas, rotuladoras de garrafas e transportes pneumáticos.

Destinadas única e exclusivamente às linhas de envase, a subestação SE 07 alimenta a linha de maior volume da planta, com produção que representa 49% do volume da unidade, enquanto a subestação SE 03 alimenta as linhas 1, 2, 3, 4 e 5, que, somadas, representam o restante do volume da fábrica. Em ambas as subestações, as principais cargas são conversores de frequência, motores de indução, servomotores, Interfaces Homem-Máquina (IHM), Controladores Lógicos Programáveis (CLP), entre outros. As subestações 69, SE 05, SE 06 e SE 07 foram projetadas e instaladas no ano de 2011. As demais subestações entraram em operação no ano de 1996, sendo que, dessas, a única que apresentou alterações nas cargas instaladas foi a subestação SE 03.

1.1 Justificativa

O atual cenário econômico leva as empresas a traçarem estratégias cada vez mais ousadas na busca da alta eficiência e na redução dos desperdícios. Por isso, ao invés de passar para o custo final do produto os valores dos desperdícios e da ineficiência de suas linhas de produção, investem em tecnologias e automação dos seus parques fabris.

Contudo, as tecnologias empregadas nos novos equipamentos são muito suscetíveis aos distúrbios presentes na rede elétrica.

A princípio, o mais comum entre os efeitos gerados pelos distúrbios são queimas de placas eletrônicas, drives e conversores de frequência, aquecimentos de condutores, entre outros. Uma possível causa para essas ocorrências é a presença de distorções harmônicas nas instalações, geradas por cargas não lineares presentes nas próprias instalações.

Quando observada uma ocorrência inesperada no processo produtivo, gera-se uma ineficiência e um grande desperdício de matéria prima.

Em virtude dessas paradas inesperadas, no ano de 2018, observou-se um aumento no caso de queimas de placas sem motivos aparentes, representando uma redução na eficiência da fábrica de 3%. Por conta disso, foram desperdiçados mais de R\$350.000 em produto acabado.

Este projeto propõe uma metodologia para avaliar a qualidade de energia da subestação SE 03 e solucionar os problemas encontrados. Foi escolhida a subestação SE 03 por ser esta a mais antiga subestação da unidade fabril e, também, a que mais teve alterações de cargas instaladas em mais de 20 anos de operação.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo de qualidade de energia da subestação SE 03 da empresa alimentícia, o qual inclua o reconhecimento das distorções harmônicas presentes e o projeto de um filtro que reduza estas distorções a níveis aceitáveis segundo as normas técnicas vigentes.

1.2.1 Objetivos Específicos

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

- realizar o levantamento prático dos dados de energia elétrica da subestação;
- avaliar o relatório de qualidade de energia e identificar as distorções harmônicas presentes na instalação;
- modelar a carga da subestação SE 03 da indústria sob análise em um software de simulação;
- realizar o projeto de um filtro passivo que reduza as distorções harmônicas abaixo dos valores máximos definidos nas normas vigentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Será apresentada, a seguir, a revisão teórica relacionada à interferência das harmônicas em uma rede industrial.

Nesta etapa, serão apresentados o conceito de distorções harmônicas, seus efeitos, suas fontes e o que fazer para mitigar. Com o crescimento da preocupação com a qualidade de energia, torna-se indispensável um estudo minucioso neste tema tão importante e que pode gerar grandes problemas, caso não seja abordado a partir de fundamentação específica.

2.1 Qualidade da Energia

O fornecimento e a distribuição de energia elétrica aumentam a qualidade de vida da população, geram empregos e um maior conforto no lar.

Um fornecimento de energia elétrica de qualidade não se reserva apenas à continuidade do fornecimento, mas também aos parâmetros ideais e adequados de tensão e frequência. (SILVA, 2012).

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

Contudo, sem realizar uma análise profunda no comportamento do sistema elétrico, identificando os geradores de distúrbios e atuando na causa efetiva do problema, não haverá avanço na qualidade de energia elétrica (QEE). (CARVALHO, 2004).

Tanto para as concessionárias quanto aos consumidores, a preocupação com a QEE é tanta que se trata como um assunto emergencial, sendo disponibilizado, para a questão, apoio internacional e justificado pelas seguintes causas (PAULILO, 2013):

- as máquinas do passado eram mais robustas e não tinham tanta percepção da variação da QEE. Certos tipos de distúrbios podem estar ocorrendo há décadas, sem serem percebidos. Contudo, agora, com a utilização de equipamentos mais modernos e sensíveis, os efeitos desses distúrbios são mais aparentes;
- o aumento considerável da automação industrial e a busca para reduzir o consumo de energia elétrica resultou em uma crescente aplicação de equipamentos de alta eficiência. Esse novo perfil acarretou o incremento das amplitudes das componentes harmônicas nas redes elétricas e a interferência destes níveis nas futuras gerações;
- o crescente interesse dos consumidores pelo assunto “qualidade de energia”. A informação está bem mais disseminada entre a população sobre os efeitos de alguns fenômenos como: interrupção, descargas elétricas e transitórios de chaveamentos.

Tanto para os equipamentos industriais quanto para os equipamentos comerciais e residenciais, a interferência na operação é ocasionada pelos mesmos geradores de distúrbios, como a partida de grandes motores, curtos-circuitos na rede, grande quantidade de cargas não-lineares e fenômenos naturais. (FARIA, 2014).

Para Paulilo (2013), a partir da interferência na operação pelos distúrbios gerados, os setores afetados tendem a, junto com os órgãos governamentais, encontrar soluções para a redução desses distúrbios. Assim sendo, a QEE está vinculada ao bom fornecimento da energia elétrica, ao custo benefício desta e ao fornecimento confiável e seguro, respeitando o meio-ambiente e a qualidade de vida das pessoas.

2.1.1 Distúrbios que afetam a qualidade da energia

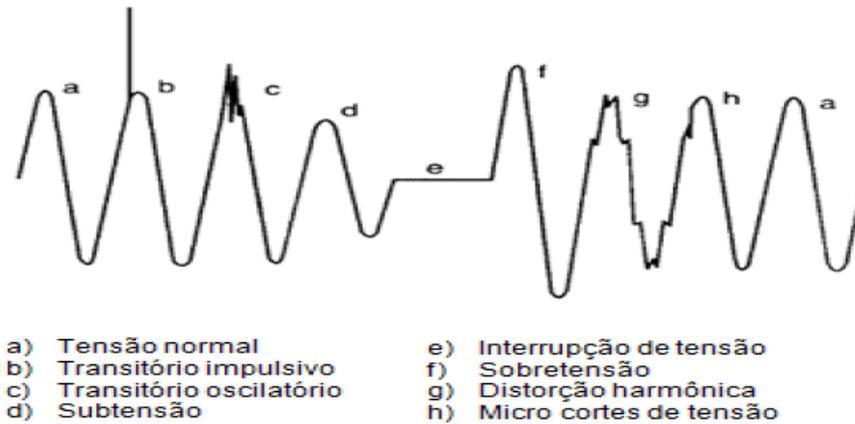
O Brasil, com sua extensão de área quase que continental, tem um complexo sistema elétrico, que, por conta de sua complexidade, pode chegar à instabilidade, por conta dos distúrbios que influenciam diretamente na distorção da forma de onda de tensão e corrente. (BALTAZAR, 2007).

Conforme Paulilo (2013), a QEE, em um sistema elétrico, é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios:

- transitórios: São fenômenos de curta duração, mas submetem os equipamentos a grandes oscilações;
- variações de tensão de curta duração (<3 minutos): Pode ser provocado por energização ou saídas de grandes cargas, ou por intermitentes falhas nas conexões de cabos do sistema;
- variações de tensão de longa duração: Semelhantes ao anterior, mas com tempo de duração superior a 3 minutos;
- desequilíbrios: É o conjunto trifásico de tensão ou de corrente de diferentes valores de módulo entre fases, ou defasagem angular diferente de 120° entre as mesmas;
- distorções de formas de ondas: É a influência que a forma de onda senoidal recebe, na frequência fundamental, e é caracterizado principalmente pelo seu conteúdo espectral. Pode ser classificada como uma das principais causadoras desses distúrbios às cargas não lineares;
- flutuações de tensão: Correspondem às variações aleatórias da magnitude da tensão RMS ou de pico da rede, podendo ter períodos aleatórios ou, até mesmo, períodos repetidos;
- variações de frequência: Caracteriza-se pela alteração do valor da frequência (60 Hz no caso do Brasil) por períodos determinados pelo Prodist módulo 8.

Conforme Leão (2014), as perturbações elétricas podem ser divididas em duas categorias: eventos e distúrbios sustentados (ou permanente). A Figura 1 e os Quadros 1 e 2 relacionam os tipos de distúrbios elétricos, nas categorias eventos e distúrbios permanentes, com suas respectivas formas de onda, duração e métodos de caracterização.

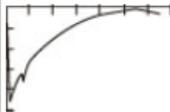
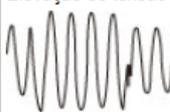
Figura 1 - Formato da onda senoidal versus distúrbio



Fonte: Adaptado de Baltazar (2007)

Cada tipo de distúrbios vistos na Figura 1 gera um tipo de efeito na energia fornecida. Para esses efeitos, há diversas técnicas de mitigação.

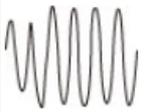
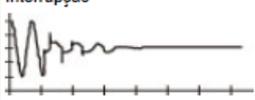
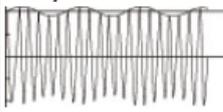
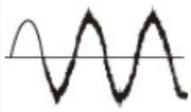
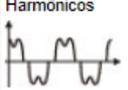
Quadro 1 – Distúrbios elétricos na categoria eventos

Tipo de Distúrbios	Duração	Método de Caracterização
Transitório impulsivo 	Curta duração < 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	Tempo de subida 5 ns 1 μs 0,1 ms Magnitude de pico Duração
Transitório oscilatório 	Curta duração 0,3 – 30 μs 20 μs 5 μs	Tempo de subida Banda de frequência Baixa frequência: < 5 kHz Média frequência: 5 – 500 kHz Alta frequência: 0,5 – 5 MHz Magnitude de pico 0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
Interrupção 	Curta duração	Magnitude < 0,1 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de ocorrência
Afundamento de tensão 	Curta duração	Magnitude 0,1 – 0,9 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de ocorrência
Elevação de tensão 	Curta duração	Magnitude 1,1 – 1,8 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de ocorrência

Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Os Quadros 1 e 2 trazem as devidas durações e método de caracterização dos seus parâmetros pré-determinados, conforme os tipos de distúrbios.

Quadro 2 – Distúrbios elétricos sustentados

Tipos de Distúrbios	Duração	Métodos de caracterização
Sobretensão 	Estado permanente	Magnitude 1,1 – 1,2 pu Duração > 1min
Subtensão 	Estado permanente	Magnitude 0,8 – 0,9 pu Duração > 1min
Interrupção 	Estado permanente	Duração > 3min Frequência de ocorrência
Flutuação de tensão 	Estado permanente	Variação da magnitude Frequência de modulação Frequência de ocorrência
Desequilíbrio de tensão 	Estado permanente	Fator de desequilíbrio
Ruídos 	Estado permanente ou Curta duração	Magnitude Espectro de frequência
Notches ou Cortes 	Estado permanente	Magnitude Duração
Harmônicos 	Estado permanente	Espectro harmônico Distorção harmônica

Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Cada tipo de distúrbio tem sua devida duração, podendo enquadrar-se em evento ou sustentado. Mas, para ser caracterizado, necessita enquadrar-se em parâmetros pré-determinados.

As características de qualidade de energia não estão ligadas apenas ao fornecimento (transmissão e distribuição), mas também, fortemente, às cargas instaladas dos consumidores. O Quadro 3 traz as principais perturbações que o sistema elétrico pode gerar à carga e a carga ao sistema. (LEÃO, 2014)

Quadro 3 – Interações sistemas-cargas-sistemas

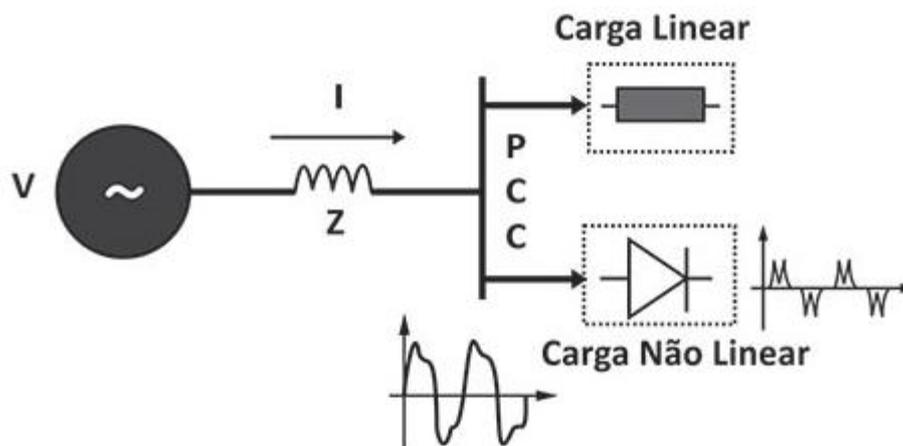
Sistema-Carga	Carga-Sistema
Afundamento/Elevação de tensão	Correntes harmônicas
Desequilíbrio de tensão	Correntes reativas
Harmônicos de tensão	Correntes desbalanceadas
Interrupção de tensão	Notches de tensão
Oscilações de tensão	Flutuação de tensão - flicker
Impulso de tensão	

Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Dependendo do tipo de carga instalada, pode haver uma mudança de perfil da tensão. Na coluna sistema-carga do Quadro 3, estão descritos os efeitos que o sistema pode causar à carga, já na coluna carga-sistema, são vistos os efeitos que a carga pode gerar ao sistema. (LEÃO, 2014)

A Figura 2 traz um diagrama simplificado da interação sistema carga.

Figura 2 – Diagrama simplificado interação sistema carga



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

A Figura 2 mostra que uma fonte senoidal alimenta tanto uma carga linear, quanto uma carga não linear. O conceito que as difere será visto no decorrer do estudo.

2.2 Distorção Harmônica

Distorção harmônica altera única e exclusivamente a forma de onda senoidal da rede. As componentes harmônicas estão geralmente presentes nas distorções das senoides da frequência fundamental. (MARTINHO, 2013).

Toda a frequência que seja múltipla inteira da fundamental é considerada uma harmônico. (ISONI, 2014).

Para Dias (2002), a ordem do sinal harmônico significa quantas vezes ele é múltiplo da fundamental. No caso da quinta harmônica, por exemplo, significa frequências cinco vezes a fundamental. Encontra-se a ordem harmônica aplicando-se a equação 2.1, na qual divide-se a frequência múltipla pela frequência fundamental.

$$h = \frac{f_{multipla}}{f_{fundamental}} \quad (2.1)$$

No caso do sistema elétrico Brasileiro, que opera com frequência fundamental de 60 Hz, a harmônica de 2ª ordem corresponde a duas vezes a fundamental, ou seja, equivale a 120 Hz, a de 3ª ordem, a 180 Hz, e a h-ésima harmônica a (hx60) Hz. As inter-harmônicas são frequências que estão situadas entres as múltiplas inteiras da fundamental, já as frequências abaixo da fundamental são chamadas de sub-harmônicas. O Quadro 4 traz a representação das classes harmônicas em f_1 , representando a frequência fundamental da onda. (ISONI, 2014).

Quadro 4 – Componentes espectrais de formas de onda de frequência f

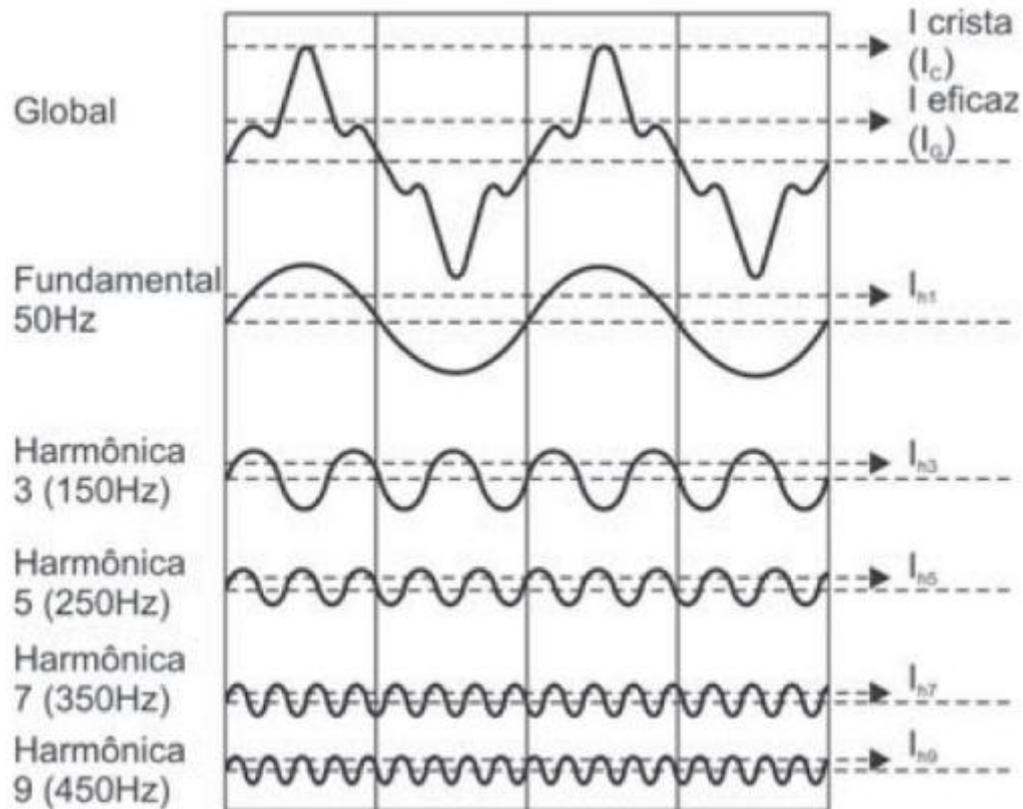
Distorção	Frequência
Harmônica	$f = h_f$, em que h é um numero inteiro maior que <u>zero</u>
Componente cc	$f = h_f$, em que $h = 0$
Inter-harmônica	$f = h_f$, em que h é um número não inteiro maior que <u>zero</u>
Sub-harmônica	$f = h_f$, em que $0 < h < t$

Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Assim sendo, um sinal senoidal é decomposto pela quantidade de harmônicos presentes na rede. Todo o sinal periódico e não senoidal pode ser representado por uma série composta de expressões. Fourier demonstra que essa expressão é a soma da expressão senoidal em frequência fundamental com as expressões senoidais de frequências múltiplas (harmônicos). (MARTINHO, 2013)

A Figura 3 mostra a representação da decomposição de um sinal distorcido.

Figura 3 – Representação da decomposição de um sinal distorcido



Fonte: Adaptação de Martinho (2013).

Como pode ser visto na Figura 3, a frequência fundamental é 50 Hz, uma onda senoidal perfeita, mas com a interferência de cargas não lineares, esta onda é distorcida pelas harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem, gerando a onda Global.

Os distúrbios que impactam na qualidade de energia, oriundos das harmônicas, não são transitórios ou temporários, e sim de natureza contínua. Por serem permanentes, estes fenômenos merecem soluções mais criteriosas. (MARTINHO, 2013).

Para Silva (2008), uma forma simples de fazer a análise da onda distorcida é através das séries de Fourier, esta decompõe a forma de onda utilizando recursos matemáticos.

Por meio dessa ferramenta matemática, pode-se estabelecer uma relação entre função contínua no tempo com uma função discreta no domínio da frequência. A equação 2.2 é a expressão da série de Fourier.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_n \cos(hw_0t) + b_n \text{sen}(hw_0t)] \quad (2.2)$$

onde:

a_0 = Componente contínuo ou valor médio;

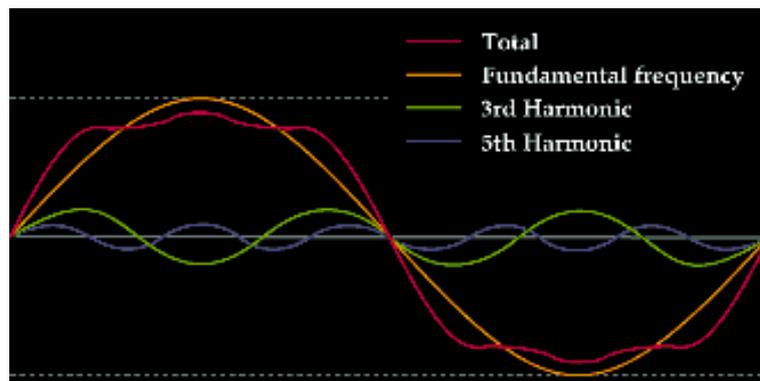
a_n e b_n = Amplitude senoidal na componente alternada;

ω_0 = Frequência angular da fundamental, onde $\omega_0 = 2\pi/t$;

h = Ordem harmônico.

Como exemplo, a figura 4 apresenta a decomposição de uma onda.

Figura 4 – Fundamental e a resultante das diversas ordens harmônicas



Fonte: Adaptado de Silva (2008).

Pode ser vista na Figura 4 a frequência fundamental e suas componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens, bem como a onda composta, representando os efeitos das três somadas.

2.3 Regulamentação e Normas para Harmônicas

Os órgãos governamentais estabelecem através de regulamento técnico ou procedimentos de rede os critérios e características de produto e processo. No Brasil o sistema elétrico está sob a responsabilidade do ministério de minas e energia, o órgão governamental responsável pela fiscalização e regulamentação é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vinculada ao ministério de minas e energia. Essas normas operam desde a geração, transmissão, distribuição e consumo, ou seja, todo o processo da geração até o consumidor final, sendo ele industrial ou residência. (WEBER, 2015).

As normas que regulamentam e normatizam a qualidade de energia elétrica são destacadas a seguir:

- IEEE-519 (2014) Norma internacional – Estabelece requisitos para controle harmônico em sistemas de energia elétrica;
- IEEE-1459 (2010) Norma internacional – Defini padrões para as medições da energia elétrica, equilíbrio de onda senoidal;
- IEEE-1250 (2011) Norma internacional – Identificação e melhoria da qualidade de tensão em SEP;
- IEEE-1159 (2009) Norma internacional – Esta norma recomenda o acompanhamento das características de energia, determina técnicas de medição, técnicas de aplicação e a interpretação dos resultados;
- ANEEL, norma Brasileira Prodist módulo 8 (2015) – Trata-se do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Normatizam e padronizam o setor elétrico no Brasil, sendo que fiscaliza tanto a qualidade do produto fornecido, quando a qualidade do serviço prestado.

No Brasil, a ANEEL através do Prodist módulo 8 (2015) estabelece símbolos e terminologias aplicáveis às formulações as distorções harmônicas, o Quadro 5 traz essa terminologia.

Quadro 5 – Grandezas e símbolos aplicáveis à formulação das harmônicas

Identificação da Grandeza Símbolo	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
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	$h_{mín}$
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT95%
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 Prodist Módulo 8 (2015).

A ANEEL (2015) estabelece as expressões para os cálculos das grandezas $DIT_h\%$ equação 2.3 e DTT% equação 2.4.

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_l} \times 100 \quad (2.3)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_l} \times 100 \quad (2.4)$$

As expressões para os cálculos da $DIT_h\%$ e $DTT_h\%$ calculam as distorções harmônicas de tensão, mas também servem para calcular as distorções harmônicas de corrente, apenas mudando no denominador o V_l pelo I_l e no numerador o V_h pelo I_h . (LEÃO, 2014).

As distorções harmônicas estão referenciadas pela ANEEL (2015) no Quadro 6, descrito abaixo.

Quadro 6 – Referência para distorções harmônicas máxima de tensão

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,00%	8,00%	5,00%
$DTT_p,95\%$	2,50%	2,00%	1,00%
$DTT_i,95\%$	7,50%	6,00%	4,00%
$DTT_z,95\%$	6,50%	5,00%	3,00%

Fonte: ANEEL Prodist Módulo 8 (2015).

Enquanto o Quadro 6 referencia os limites de distorções harmônicas totais de tensão, o Quadro 7 coloca limites aos valores das distorções individuais.

Quadro 7 – Limites para distorções harmônicas individuais

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL Prodist Módulo 8 (2015).

Para se ter controle em relação as distorções harmônicas, estabeleceu-se os limites de distorções harmônicas individuais. O sistema é todo interligado, sendo que

o ponto de acoplamento comum (PAC) conecta os consumidores tanto na energia sem a distorção harmônica, quanto a energia com este distúrbio. (LEÃO, 2014).

Os limites de distorção harmônica total de corrente devem ser classificados de duas maneiras, quanto à ordem harmônica individual e em relação à tensão nominal do circuito. A IEEE-519 (2014) estabelece que o ponto de medição deva ser o mais próximo possível da fonte consumidora, e denomina esse ponto de ponto de acoplamento comum (PAC). Os limites de distorção harmônica de corrente respeitam as faixas de tensão estabelecidas: de 120 V a 69.000 V, 69.001 V a 161.000 V e superiores a 161.001 V. (LEÃO, 2014).

No Quadro 8 pode-se verificar os valores de distorção harmônicas total de corrente máxima.

Quadro 8 – Limites das distorções harmônicas de corrente em uma tensão de 120 V a 69.000 V

Máxima distorção harmônica de corrente em porcentagem %						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						TDD %
I_{cc}/I_L	$H < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
$< 20^*$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: IEEE-519 (2014).

No Quadro 8 o I_{cc} refere-se a corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum, já I_L corresponde a corrente máxima na carga, no ponto de acoplamento comum. A taxa de distorção harmônica de demanda TDD, pode ser considerado o mesmo que DHT_i , porém a TDD refere-se a média dos últimos doze meses. (LEÃO, 2014).

2.4 Efeito harmônico

Segundo Martinho (2013), os efeitos harmônicos começaram a ser detectados em meados da década de 80, pois nesta época iniciou-se a utilização em larga escala da automação industrial nos processos produtivos. Tal automação foi necessária para otimização de gastos, aumento da produtividade e redução de perdas por problemas de qualidade. Foi a partir desta época, com o grande aumento

da tecnologia empregado nos novos equipamentos, que o uso das cargas não lineares começou a aumentar. Percebeu-se assim a deformidade na forma de onda senoidal, prejudicando os equipamentos mais sensíveis a este fenômeno.

Para Ndiaye (2006), quando são projetados os geradores de energia elétrica busca-se uma tensão de onda senoidal, isso é conseguido perfeitamente com a ajuda da tecnologia e os estudos aprofundados. Nas proximidades dos barramentos das usinas, podemos afirmar que as distorções da forma de onda de tensão são praticamente nulas. Porém, em outros pontos, se verificam tensões com diferentes tipos de distorções harmônicas, isso principalmente longe das fontes geradoras de energia.

Segundo Dias (2002), pode haver dois tipos de cargas conectados ao sistema, cargas lineares e cargas não lineares. Uma carga conectada ao sistema pode afetar outras cargas se uma significativa distorção for produzida.

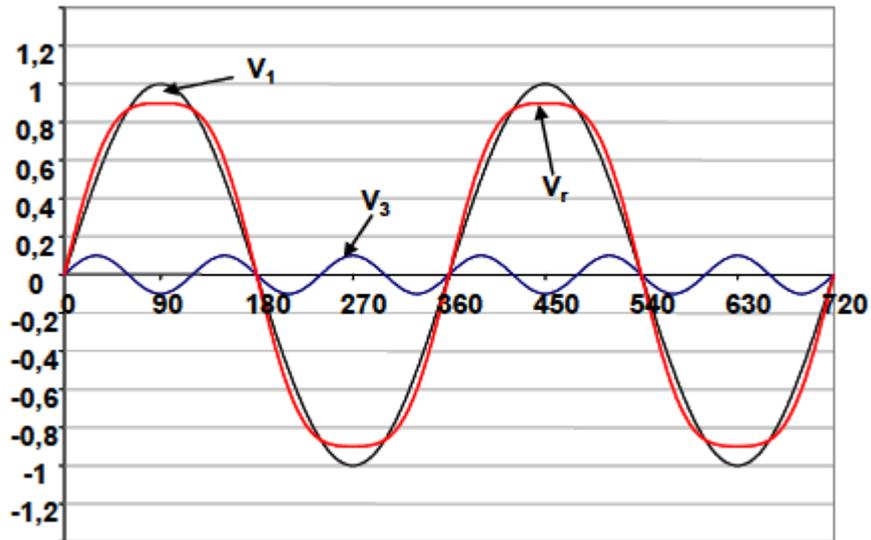
Nogueira (2011) diz que as cargas não lineares são aquelas que se utilizam de ondas de tensão senoidais para gerar distorções.

Para Dias (2002), a distorção de uma dada corrente não garante que outros consumidores detectem essa distorção. Considerando uma impedância do sistema pequena, a distorção da tensão passa despercebida na ausência da ressonância harmônica. As distorções harmônicas geram alguns efeitos que são:

- interferência em sistemas de controles computacionais;
- aquecimento de máquinas rotativas;
- sobreaquecimento ou falha em banco de capacitores.

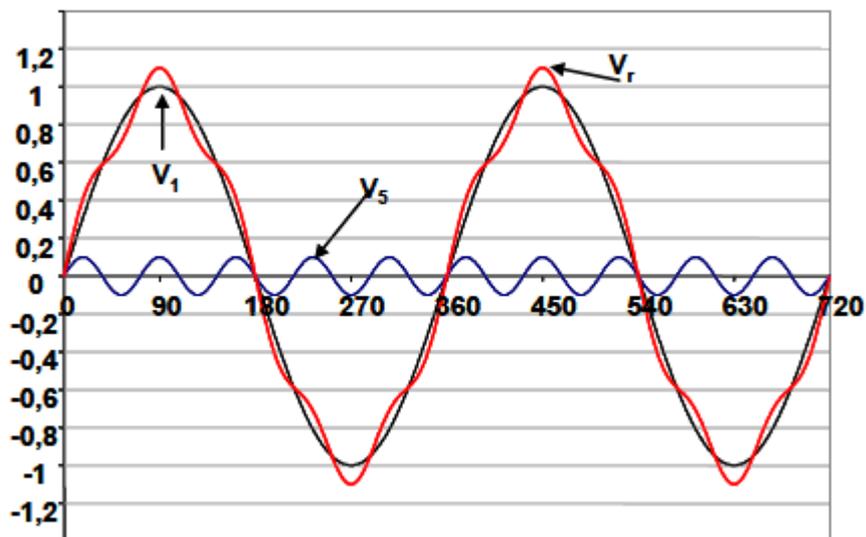
A Figura 5 apresenta a composição de uma forma de onda senoidal com frequência em 60Hz com 10% de terceiro harmônico (180Hz) e a Figura 6 apresenta a composição de uma forma de onda senoidal com frequência em 60Hz com 10% de quinto harmônico (300Hz). Em ambos os casos observa-se a distorção provocada na forma de onda. (NDIAYE, 2006).

Figura 5 – Tensão distorcida por um décimo de terceiro harmônico



Fonte: Adaptado de Ndiaye (2006)

Figura 6 – Tensão distorcida por um décimo de quinto harmônico



Fonte: Adaptado de Ndiaye (2006).

Tanto na Figura 5 quanto na Figura 6, a influência da ordem harmônica é muito expressiva, mas observa-se que quanto maior a ordem maior a distorção.

Uma parte da QEE afetada pela alta taxa de distorção harmônica total (DHT) gera as desvantagens citadas abaixo. (GAMA, 2017):

- aumento da perda pelo efeito Joule;
- sobredimensionamento das instalações elétricas e de seus componentes;
- harmônicos de frequência alta podem gerar sobrecargas dos condutores de fase;

- os condutores de neutro podem sofrer sobrecargas quando as instalações apresentarem harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas;
- os dispositivos de comando, controle e proteção podem não funcionar corretamente;
- elevação de ruídos em transformadores;
- banco de capacitores com redução da vida útil;
- elementos de proteção sendo acionados repentinamente por deformações das correntes.

Para Gama (2017), há varios efeitos sobre diversos tipos de equipamentos gerando algumas falhas e perdas, podemos destacar alguns abaixo:

- cabos de Alimentação: Tem perda pelo efeito Joule, um aumento na queda de tensão devido à circulação dos harmônicos de corrente;
- transformadores: Um sobreaquecimento nos transformadores mesmo com cargas dentro da nominal. Os harmônicos causam perdas adicionais no núcleo e no cobre;
- motores de indução: Conforme ocorrem com os transformadores, os motores de indução submetidos aos efeitos dos harmônicos ocorrem perdas no núcleo e no cobre, gerando envelhecimento precoce do material isolante;
- banco de capacitores: Fornecem um caminho de menor impedância para as harmônicas de correntes, isso eleva suas perdas ôhmicas.
- transformadores de Potencial (TP): Nos TP's os efeitos harmônicos vão além dos observados nos transformadores em geral, há também a alteração da relação de transformação, sendo que os resultados mostram que podemos ter para algumas frequências harmônicas alteração significativas em relação à nominal quando na presença da frequência fundamental;
- fusíveis: Gera uma alteração na característica da curva tempo versus corrente do elemento, nos estudos de proteção, os efeitos dos harmônicos devem ser observados com rigor;
- disjuntores e Reles de proteção: Seu funcionamento é consideravelmente prejudicado, o efeito dos harmônicos provoca um aumento da temperatura

de operação, e com isso uma alteração na capacidade nominal da corrente de operação.

2.5 Caracterização das Perturbações

A Série de Fourier, das equações 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8, pode ser decomposta da drenagem da corrente oriunda de uma carga não linear, levando em conta que esta carga não linear é alimentada por tensão puramente senoidal. (NDIAYE, 2006).

$$v_s(t) = V_s \sqrt{2} \cdot \text{sen}(2\pi f_0 t) \quad (2.5)$$

$$i_c(t) = i_{cf}(t) + i_{ch}(t) \quad (2.6)$$

$$i_{cf}(t) = I_{cf} \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_1) \quad (2.7)$$

$$i_{ch}(t) = \sum_{h=2}^{\alpha} i_{ch} \cdot \text{sen}(2\pi h f_0 t + \varphi_h) \quad (2.8)$$

onde,

f_0 = Frequência da fundamental;

I_c = Corrente da carga;

V_s = Valor eficaz da tensão;

I_{cf} = Valor eficaz da corrente fundamental na carga;

I_{ch} = Valor eficaz da corrente de ordem h na carga;

φ_1 = Defasagem entre corrente fundamental de carga e tensão da fonte;

φ_h = Dessintonia entre corrente harmônica de ordem h da carga e tensão da fonte.

Segundo Leão (2014), algumas características sobre a análise de sinais não senoidais utilizando a Série de Fourier são:

- análise de Fourier é a ferramenta matemática que permite obter a decomposição de uma função nas suas componentes espectrais;
- ondas periódicas não senoidais podem ser decompostas em uma série infinitas de ondas senoidais denominadas “harmônicas” calculadas pela Série de Fourier;
- o somatório de sinusóides de frequências múltiplas resulta em uma onda distorcida;

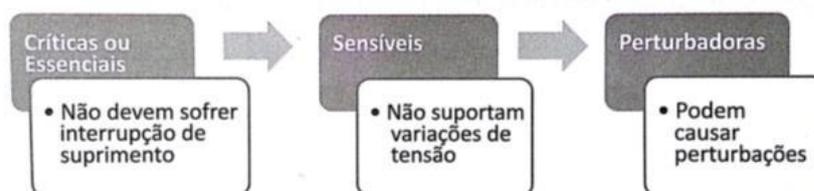
- a componente fundamental de uma onda periódica não senoidal define o período do sinal distorcido;
- a análise de Fourier, quando aplicada a um sinal no domínio do tempo periódico contínuo, resulta em uma série de componentes de frequência discretas no domínio da frequência. Ondas não periódicas apresentam espectro contínuo;

2.6 Principais Fontes de Harmônicos

Há conectado no sistema elétrico uma variedade de tipos de cargas, as quais possuem características de funcionamento e de influência peculiares no sistema. Esses tipos de cargas podem ser classificados principalmente em dois grupos, lineares e não lineares. Essa classificação vai depender do seu tipo de construção, forma de onda de corrente gerada e o impacto no sistema elétrico. (FIGUEIREDO, 2006).

Em contraponto ao sugerido por Figueiredo (2006), Leão (2014) sugere que as cargas sejam classificadas por críticas, sensíveis e perturbadoras. A Figura 7 mostra essa classificação.

Figura 7 – Classificação das cargas



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Cargas críticas ou essenciais são consideradas cargas indispensáveis, ou seja, são cargas que no caso de interrupção do fornecimento de energia podem pôr em risco vidas humanas ou resultar em grandes prejuízos. Todavia essas cargas podem ser caracterizadas por lineares e não lineares, como as dos centros de controle de vôos, hospitais e grandes centros de dados financeiros. (LEÃO, 2014).

As cargas sensíveis são, na sua maioria, não lineares e suportam variações de tensões de no máximo 30 ciclos. A indústria é a principal afetada, pois as cargas sensíveis fazem parte de suas instalações. (MAIA, 2011).

Cargas perturbadoras são quaisquer cargas conectadas à rede elétrica, que possa gerar como resposta do seu funcionamento adequado ou não, uma corrente dotada de perturbação, na sua maioria também pertencentes às indústrias. (FIGUEIREDO, 2006).

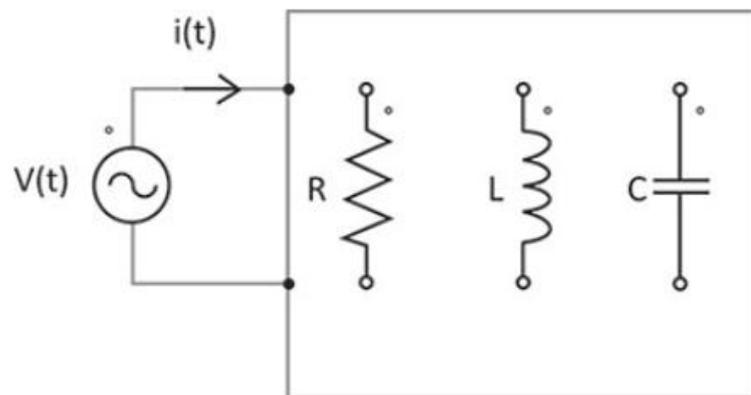
Entretanto, Leão (2014) diz que uma mesma carga pode ter características simultâneas das três classes.

2.6.1 Cargas Lineares

O termo carga linear descreve uma classe de cargas que, ao serem alimentadas por uma fonte de tensão senoidal, produzem somente corrente senoidal da mesma frequência que a fonte de alimentação. As cargas lineares são compostas exclusivamente por elementos passivos tais como: resistores, capacitores e indutores ou por uma associação destes. (FIGUEIREDO, 2006).

A Figura 8, de conformidade com Figueiredo (2006), demonstra um circuito elétrico com os elementos passivos.

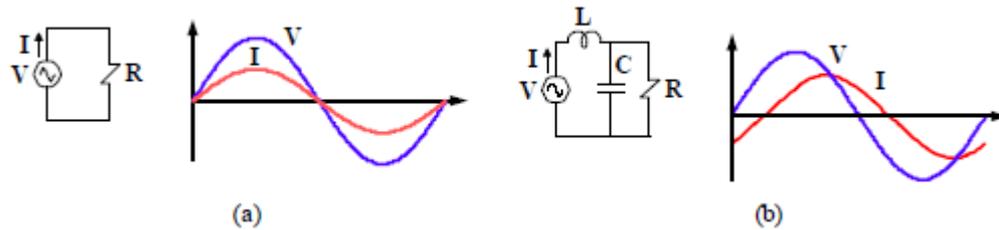
Figura 8 – Circuito elétrico com componentes passivos lineares



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2006).

Já na Figura 9, estão representadas cargas lineares e suas respectivas formas de onda de corrente drenadas do sistema de alimentação.

Figura 9 – Cargas lineares: (a) puramente resistivas (b) associação RLC



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2006).

Os elementos passivos, associados ou não, mostrados na Figura 8 geram as formas de ondas mostradas na Figura 9. Quando são elementos resistivos a corrente e a tensão estão em fase, mas quando há uma associação entre esses elementos há uma defasagem entre tensão e corrente.

2.6.2 Cargas Não Lineares

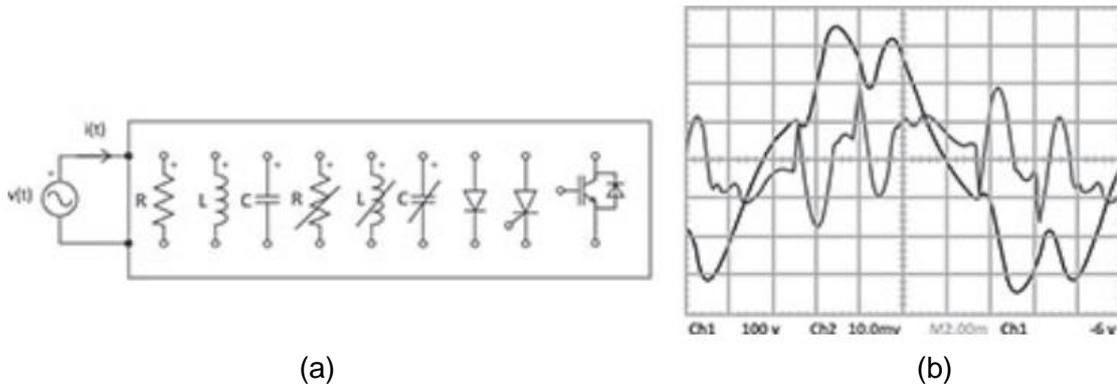
São as cargas cuja corrente se comportam de maneira não senoidal. Por conseguinte, qualquer carga que utilizar uma tensão senoidal e que drene uma corrente não senoidal, ou cuja impedância equivalente sofra variação durante o ciclo da forma de onda da tensão de entrada é considerada uma carga não linear. (FIGUEIREDO, 2006). Martinho (2013) difere este distúrbio dos efeitos temporários, pois são distúrbios que tendem a ter comportamento constante.

Todavia, Moreno (2001) destaca que essas cargas produzem distorções na forma de onda da corrente e tensão, ou seja, acabam por gerar harmônicos. Atualmente, nos consumidores industriais localiza-se a maior concentração dessas cargas de potência elevadas.

Com isso, as cargas não lineares podem ser divididas em dois grupos: convencionais e chaveadas. As convencionais não utilizam interruptor estático nem interruptores eletrônicos, sendo que podemos citar como cargas convencionais os transformadores, máquinas elétricas, reatores de núcleo de ferro magnético, e fornos elétricos a arco. Já para as cargas chaveadas existe uma vasta gama de equipamentos, como conversores estáticos de energia, inversores (cc-ca), sistema de retificação e acionamentos (ca-cc), acionadores eletrônicos de velocidade variável, fotocopiadoras, televisores, fontes chaveadas, computadores pessoais, dentre muitos outros. Essas cargas fazem uso de diodos, transistores e tiristores, sendo que todos eles operam em modo interrupção ou bloqueio. (LEÃO, 2014)

A Figura 10 mostra a influência dos interruptores estáticos na geração de harmônicos.

Figura 10 – a) Interruptores b) ondas não senoidais geradas



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

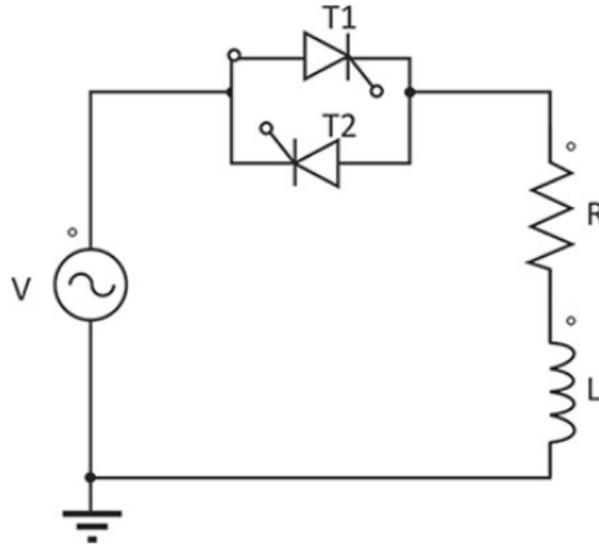
Para Moreno (2001), o modo de interrupção dos interruptores estáticos funciona basicamente em dois estados, estado de condução e estado de bloqueio. O estado de condução é quando o equipamento está em condução, ou seja, corresponde ao interruptor fechado, a corrente que passa pelo dispositivo alcança altos valores, mas a queda de tensão tende a zero. Com isso a dissipação da potência é mínima. Já o estado de bloqueio é quando o elemento está aberto. Neste caso a queda de tensão no dispositivo é elevada, mas a corrente tende à zero, onde também é baixa a potência dissipada neste dispositivo.

Conforme Leão (2014), os interruptores eletrônicos podem ser divididos em dois tipos, controlados e não controlados. O primeiro é um dispositivo que a condução se dá mediante um circuito de controle. Esse controle determina o momento do disparo e da condução. Fazem parte deste grupo os transistores bipolares, mosfet, tiristores, IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistor*), entre outros. Entre os dispositivos não controlados, o diodo é o mais usado, ele é um semicondutor mais simples e base para circuitos e até mesmo outros componentes, sua condução é natural, autocomutada, que ocorre de acordo com a polarização da fonte, onde a polarização direta acarreta em condução e a reversa no bloqueio.

Para Leão (2014), todos os semicondutores de potência podem mudar rapidamente de estado, e isso acaba gerando distorções na forma de onda.

A Figura 11 mostra um circuito usando um tiristor para controlar uma carga linear formada por resistor em serie com o indutor.

Figura 11 – Dispositivo de controle da corrente e da tensão na carga

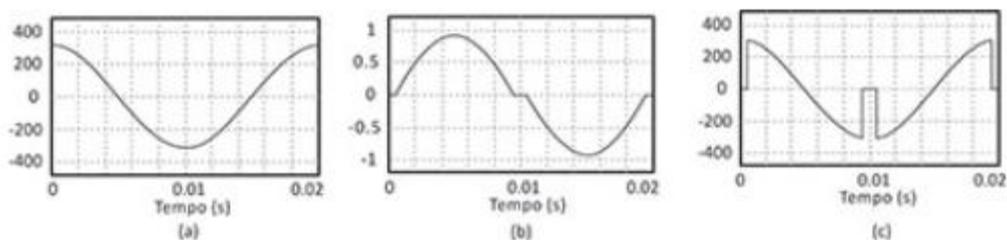


Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Embora a fonte alimentadora do circuito da Figura 11 seja senoidal, os tiristores T1 e T2 tem a função de controlar a passagem da corrente que alimenta a da carga linear RL. A corrente sofre interrupções durante alguns instantes de tempo, o que gera interrupções na tensão também, deixando esta de ser senoidal e ficando distorcida. (LEÃO, 2014).

A Figura 12 representa a forma de onda gerada pelos circuitos dos dispositivos de controle da corrente e da tensão na carga.

Figura 12 – Formas de onda: (a) Tensão de alimentação; (b) Corrente distorcida da carga; (c) Tensão distorcida da carga.



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

As três formas de ondas da Figura 12 mostram a distorção gerada por um interruptor eletrônico, mas este controlando uma associação de cargas lineares.

2.7 Filtros de Harmônicos

As distorções harmônicas estão presentes no sistema elétrico em quantidades variadas, sendo que os harmônicos de tensão e correntes devem ser tratados apenas quando esses passam dos limites estabelecidos pela ANEEL e se tornam um problema. No nascimento do projeto de novas instalações elétricas ou na aquisição de um novo equipamento ocorrem os melhores momentos para realizar a análise de mitigação de harmônicos. (LEÃO, 2014).

Conforme Teixeira (2009), os filtros de harmônicos representam a técnica mais utilizada para tentar reduzir ou até mesmo eliminar os níveis de distorções harmônicas no sistema elétrico. Devido à complexidade e ao custo elevado, há algumas ideias alternativas sendo trabalhadas para a eliminação das distorções harmônicas, como por exemplo: eliminação por compensação de fluxo magnético; eliminação por injeção harmônica e eliminação por injeção de “ripple”.

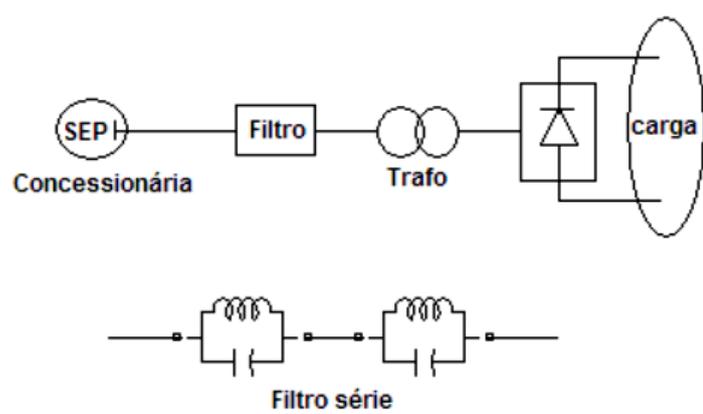
Segundo Leão (2014), os filtros são divididos em dois grupos, filtros ativos e filtros passivos, sendo que o primeiro é composto de amplificadores operacionais como dispositivos ativos, em combinação com resistores e capacitores, já os filtros passivos são constituídos, basicamente, de capacitores, indutores e resistores.

2.7.1 Filtros Passivos

Os filtros passivos são concebidos para atuar em uma frequência sintonizada, ou seja, atuam como bloqueio de frequências pré-determinadas. Por serem de fácil construção e de custo mais baixo, os filtros passivos são os circuitos mais utilizados para mitigação das harmônicas. (DUGAN, 2004).

O modo de conexão dos filtros ao sistema é o que determina sua classificação, podendo ser um filtro série ou um filtro “shunt”. O filtro série pode ser formado por uma indutância e capacitância em paralelo e representa uma grande impedância para a frequência que se deseja. Sua principal função é impedir a circulação de um determinado harmônico entre a carga e o sistema elétrico. Sua principal desvantagem é de ser dimensionado para suportar a corrente de plena carga do circuito, e com isso acaba se tornando mais caro. Na Figura 13 representa o filtro ligado em série com a carga. (DUGAN, 2004).

Figura 13 – Filtro ligado em série

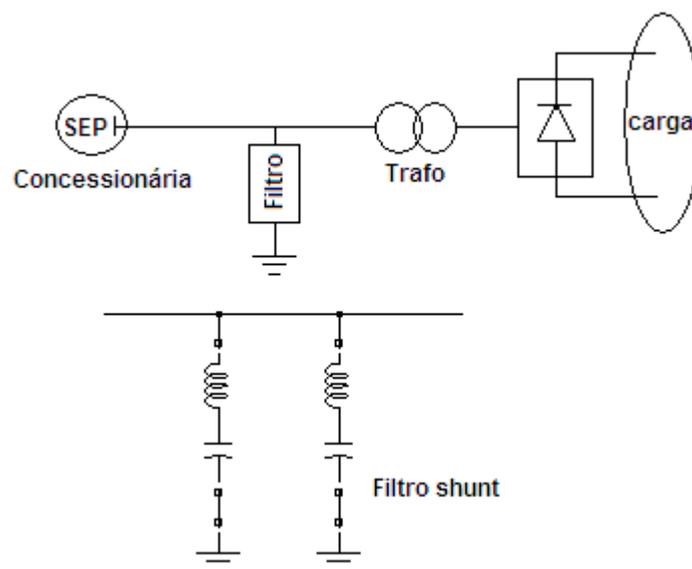


Fonte: Adaptado de Teixeira (2009).

De acordo com Leão (2014), o filtro paralelo ou “shunt” tem a finalidade de evitar que correntes harmônicas circulem por uma determinada parte do sistema elétrico, este fornece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de interesse. Esse desvio permite que não haja correntes de harmônicas em uma determinada parte do circuito.

A Figura 14 mostra a utilização de filtro passivo de sintonia simples em paralelo ligado ao sistema.

Figura 14 – Filtro ligado em paralelo



Fonte: Adaptado de Teixeira (2009).

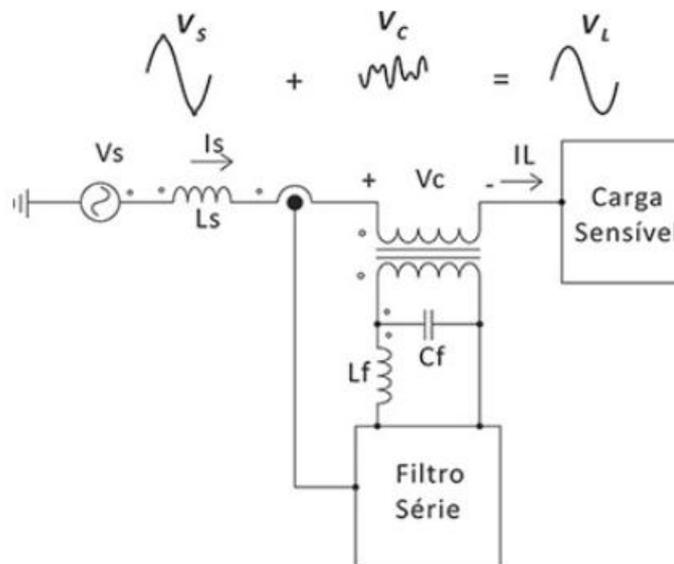
Segundo Teixeira (2009), entre as vantagens do uso de filtros paralelo pode ser destacado o custo mais baixo, pois este é dimensionado para suportar apenas a

corrente harmônica que foi projetado, também é destacado como vantagem do filtro passivo paralelo a correção do FP, quando este opera na frequência fundamental.

2.7.2 Filtros Ativos

Os filtros ativos são destinados para atuar na compensação dos harmônicos de tensão e corrente, também podem compensar desequilíbrios nas tensões e correntes, possibilitam a compensação da parcela reativa da corrente de carga: são autossintonizáveis e seletivos na filtragem. Os filtros ativos são divididos em duas grandes classes, classe série e classe paralelo. A primeira atua como fonte de tensão controlada produzindo uma tensão de compensação V_c em serie com a tensão V_s , assim temos no ponto de conexão com a carga critica uma tensão senoidal V_l , como pode ser visto na Figura 15 (LEÃO, 2014).

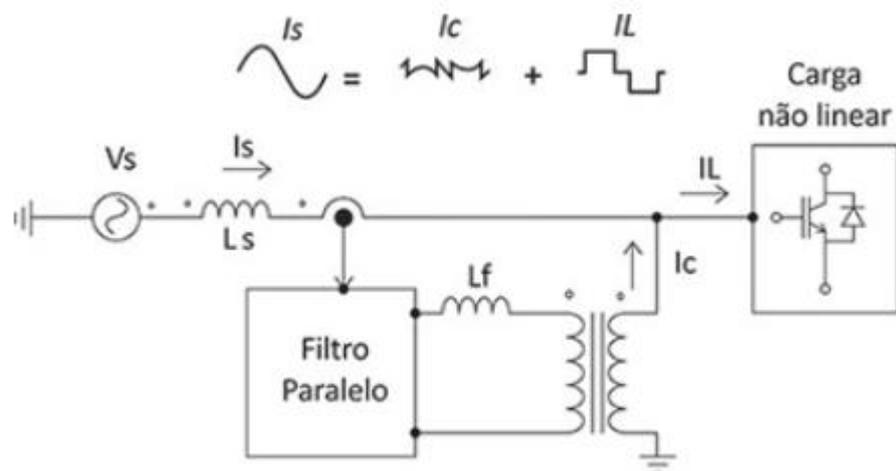
Figura 15 – Conexão ativa serie de tensão



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Conforme Leão (2014), os filtros ativos paralelo são parecidos com os filtros ativos série, mas atuam como uma fonte de corrente controlada conectada a carga, e com isso produz corrente de compensação I_c , que adicionada à corrente I_l , alimenta a carga não linear. Essa compensação faz com que a corrente I_s drenada pela fonte tenha característica senoidal. A Figura 16 mostra um exemplo do filtro passivo paralelo ligado próximo a carga não linear.

Figura 16 – Conexão ativa paralela da corrente



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

A conexão em paralelo, conforme a Figura 16 com a rede e a carga, faz com que o filtro injete uma forma de onda inversa à forma de onda distorcida pelas harmônicas, anulando assim as frequências diferentes da fundamental. (LEÃO, 2014).

2.8 Considerações Finais

Na revisão bibliográfica, foi abordada uma visão geral da qualidade da energia e detalhado o distúrbio na distorção da forma de onda. Foi possível verificar que a distorção da onda senoidal fundamental é derivada das distorções harmônicas de ordem ímpar, destacando seus efeitos sobre o sistema elétrico.

Neste íterim, serão abordados, na metodologia, conceitos para a mitigação dos efeitos harmônicos. Para tanto, serão utilizadas técnicas que contemplem melhor custo benefício para implementação em uma subestação industrial, onde este distúrbio gera paradas inesperadas provocando desperdícios e ineficiências.

3 METODOLOGIA

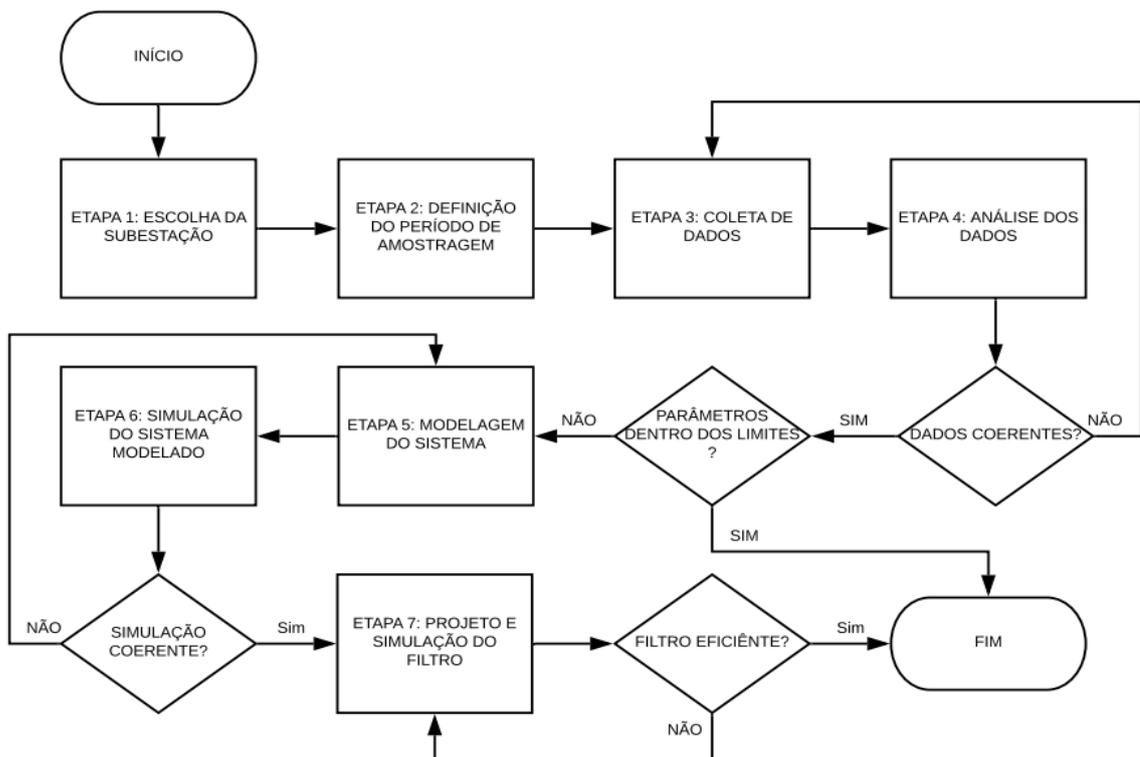
No presente trabalho, foi realizada a medição com o objetivo de verificar a qualidade de energia em uma subestação em empresa do ramo alimentício, mais precisamente, em uma engarrafadora de refrigerantes, líder de mercado. Esta fábrica é alimentada por uma subestação de 69/13,8 kV, sistema trifásico delta/estrela com frequência de 60 Hz, e outras sete subestações todas de 13,8 kV/380 V, sistema trifásico delta/estrela com frequência de 60Hz, as quais são numeradas de SE 01 a SE 07.

A metodologia aplicada no projeto em questão, visando à mitigação dos efeitos das harmônicas na planta industrial, foi baseada na norma internacional IEEE 519/2014 e no Módulo 8 do PRODIST da ANEEL.

3.1 Apresentação Geral

O fluxograma apresentado na Figura 17 representa a organização do estudo que será executado.

Figura 17 – Fluxograma adotado para elaboração do projeto



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

3.2 Dados e Parâmetros Elétricos do Sistema Modelado

Alguns dados são relevantes para a realização do estudo. Abaixo, foram elencados alguns desses dados, os quais farão parte do estudo:

- tensão de entrada da Subestação: 13,8 kV;
- tensão nominal na baixa tensão: 380 V;
- potência Máxima Instalada: 1500 kVA;
- demanda contratada na Ponta: 5300 kW
- demanda contratada Fora da Ponta: 6300 kW
- tipos de cargas instaladas: Motores elétricos, conversores de frequência, iluminação, solda ponto, resistências elétricas.

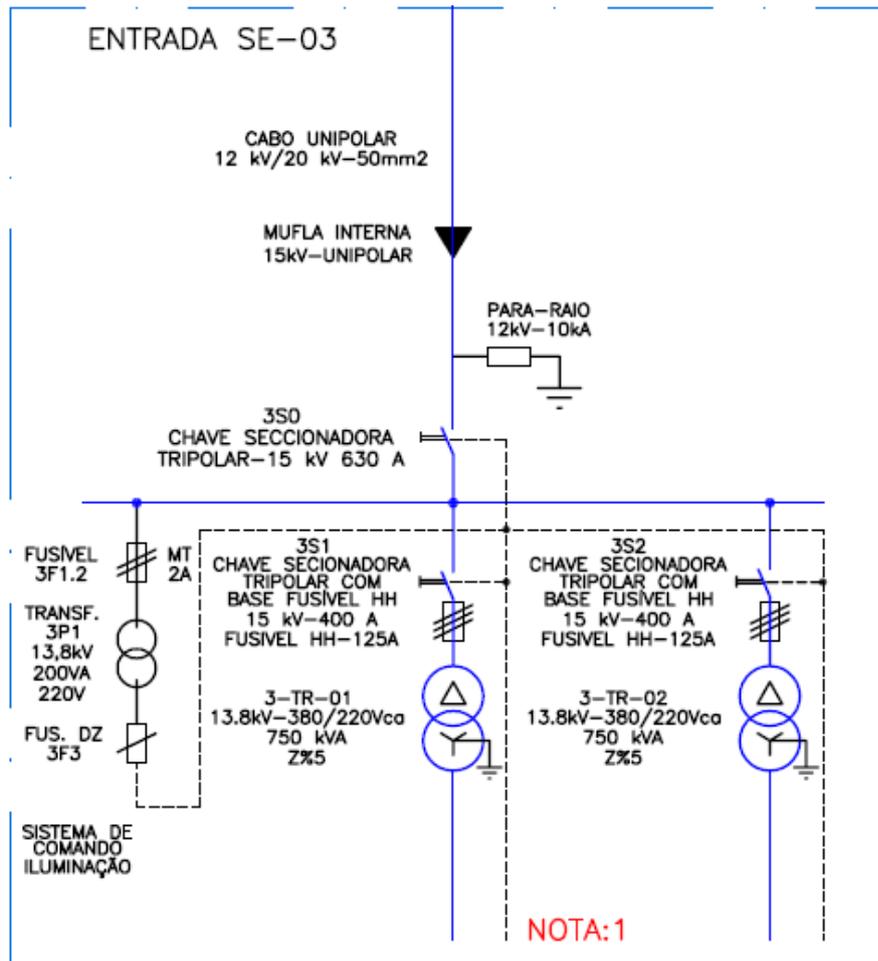
As demandas contratadas na ponta e fora da ponta referem-se à planta inteira, sendo o estudo, neste momento, será limitado a apenas uma fração da planta.

3.3 Escolha da Subestação

A escolha da subestação para o estudo se deu pelo fato de a subestação SE 03 estar em operação desde 1996, com várias alterações de cargas sem nenhuma análise de qualidade de energia. Também, pelo fato de haver um aumento nas paradas nas linhas que esta subestação alimenta, devido à queima de equipamentos sem um diagnóstico preciso.

A Figura 18 apresenta o diagrama unifilar simplificado da subestação sob estudo.

Figura 18 – Diagrama Unifilar da Subestação Analisada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Conforme apresentado no diagrama unifilar da Figura 18, sua alimentação é de 13,8 kV. Também há dois transformadores delta/estrela de 13,8 kV / 380 V de 750 kVA com impedância de 5% cada, estando em uso apenas o transformador TR-1, já que o TR-2 é o transformador de contingência.

3.4 Definição dos Tempos de Amostragem

O período de amostragem representa o tempo necessário para realizar a coleta dos dados, ou seja, o tempo que o analisador de energia deve ficar instalado na subestação realizando a coleta dos dados, bem como os intervalos de integração dos registros.

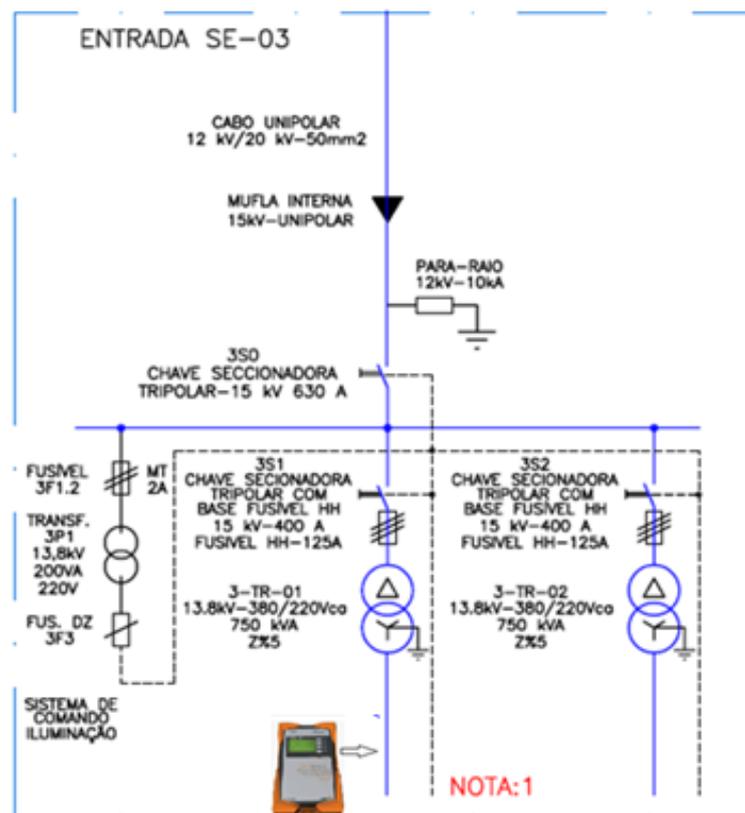
O período da coleta transcorreu-se entre os dias 03/12/2018 e 10/12/2018, ininterruptamente, estabelecendo-se o intervalo de integração de registros (resolução)

como 1 minuto, ou seja, a cada 1 minuto, o instrumento realiza um registro. O período de medição e o intervalo de registro estão em conformidade com a IEEE-519 (IEEE, 2014).

3.5 Coleta e Análise dos Dados

Nesta etapa, são coletados os dados utilizando um analisador de energia instalado na Baixa Tensão (BT). A Figura 19 mostra, no diagrama unifilar, onde foi instalado o analisador de energia.

Figura 19 – Local da instalação do Analisador de Energia



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O instrumento da Figura 19 é um analisador de energia portátil, com funções adicionais de medição de potência e gravação de fenômenos transitórios. Sua classe de proteção é IP 65. Este instrumento cumpre com as exigências da última versão da norma IEC 61000-4-30/2015 sobre equipamentos de medição. Sua tensão máxima de trabalho é de 1000 V com corrente de 0 a 2650 A. Por conta dessa característica, este instrumento só pode ser instalado em barramentos de BT (A-EBERLE, 2018).

Os dados fornecidos pelo instrumento serão:

- potência aparente;
- potência ativa;
- potência reativa;
- fator de potência;
- tensão e corrente por fase;
- taxa de distorção harmônica de corrente e tensão.

Com base no relatório emitido, os dados coletados são analisados e verificados em relação à sua coerência. Após a validação dos dados coletados, são analisados os valores de distorções harmônicas totais de tensão e comparados com os limites especificados no Módulo 8 do PRODIST, enquanto os valores de distorções harmônicas de corrente são comparados com os limites estabelecidos pela IEEE-519/2014.

3.6 Modelagem do Sistema e Ferramenta de Análise

A modelagem do sistema em um software de simulação deve traduzir a situação real tanto quanto for possível. Levando em conta que as cargas instaladas na subestação em análise são compostas por vários componentes não lineares, a Figura 20 apresenta alguns componentes não lineares que a subestação SE 03 alimenta.

Figura 20 – Cargas não lineares



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As cargas não lineares da Figura 20 são conversores de frequência marca Danfoss modelo VLT da série 2800. Esses modelos são de 6, 12 ou 18 pulsos. O

conversor de frequência controla a velocidade do motor, convertendo a tensão e a frequência normais. (DANFOSS, 2008).

Modelar uma carga não linear pode ser uma tarefa árdua, necessitando de recursos matemáticos e computacionais avançados. Uma alternativa, quando se trata de simulação de circuitos, é representar a parcela linear desta carga (ou conjunto de cargas) por meio de um circuito passivo e a geração de harmônicas que estas cargas trazem, a partir de fontes de tensão e de corrente parametrizadas com a frequência e com a amplitude das harmônicas geradas pelo equipamento, adicionando tantas fontes quantas sejam necessárias para traduzir da melhor forma o comportamento prático verificado.

Para a modelagem da parcela linear da carga, Sadiku (2008) fala que o ângulo entre $\theta_v - \theta_i$ é denominado ângulo do fator de potência (FP) gerado pela carga, sendo o FP considerado adimensional, já que pode ser facilmente calculado através da equação 3.1.

$$FP = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3.1)$$

Onde:

θ_v = É o Ângulo da tensão;

θ_i = É o Ângulo da corrente.

O ângulo da impedância da carga é igual ao ângulo do fator de potência, o qual pode ser verificado através da equação 3.2.

$$Z_L = \frac{V_m}{I_m} @(\theta_v - \theta_i) \quad (3.2)$$

Onde:

V_m = Tensão sobre a carga;

Z_L = Impedância da carga;

I_m = Corrente através da carga.

A carga é representada impreterivelmente por uma impedância, que pode ser desde um conjunto de motores, resistências, conversores de frequência, conforme visto na figura 20, e assim por diante, sendo que, na forma retangular, a impedância da carga é representada pela equação 3.3.

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (3.3)$$

Onde:

R_L = Resistência da carga;

X_L = Impedância da carga.

De acordo com Sadiku (2008), o resultado obtido na equação 3.3 é a máxima transferência de potência média para o regime estacionário senoidal.

A ferramenta de análise escolhida para o estudo foi o simulador de circuitos elétricos PSIM (POWERSIM, 2018). Já para os dados práticos, foi utilizado o relatório gerado pelo analisador de energia que foi instalado na subestação SE 03.

3.7 Modelagem do Filtro

Com objetivo de mitigar o efeito da distorção harmônica gerada pelas cargas não lineares, como pode ser visto na Figura 20, filtros passivos podem ser utilizados. Diversas topologias de filtros podem ser adicionadas em paralelo à carga, mas todos com a eficiência e eficácia na drenagem das correntes harmônicas geradas pelas cargas não lineares (NARDI, 2016).

Para este projeto, adotou-se a instalação de 30 kvar de potência reativa dos capacitores dos filtros, levando em conta que, segundo Leão (2014), a adição de potência reativa capacitiva irá fazer com que o Fator de Potência da instalação tenha uma elevação no valor, o que depende, no entanto, da escolha do local de instalação do filtro.

Segundo Oliveira (2015), para projetos de apenas um filtro passivo de sintonia única, a equação 3.4 pode ser utilizada.

$$Q_f = Q_{com} \quad (3.4)$$

Onde:

Q_f = Potência reativa do filtro na fundamental;

Q_{com} = Potência reativa dos capacitores dos filtros.

Quando a instalação requer múltiplos filtros de sintonia única em paralelo, utiliza-se a equação 3.5.

$$Q_f = Q_{com} \frac{I_h}{\sum_{h=2,3,..} I_h} \quad (3.5)$$

Onde:

Q_f = Potência correspondente ao filtro harmônico na respectiva frequência;

I_h = Corrente harmônica na respectiva ordem harmônica;

h = Ordem harmônica.

Segundo Leão (2014), a frequência em que o filtro estará sintonizado está em uma faixa de 3% a 15% abaixo da frequência desejada. Sendo este percentual

conhecido como fator de dessintonia, esta faixa fará com que a frequência de ressonância do filtro seja um pouco menor que a ordem harmônica. A dessintonia é calculada nos projetos de filtros para caso haja uma variação na impedância da carga, o filtro possa voltar a ter ressonância com a frequência Harmônica. Porém, no caso de haver uma alteração na capacitância do filtro, a dessintonia evita que a impedância do sistema entre em ressonância com o filtro. Para este projeto, utilizou-se uma dessintonia de 3%. A reatância indutiva do indutor do filtro é calculada utilizando-se da dessintonia através da equação 3.6.

$$X_{L,1} = \frac{X_{c,1}}{(h-d)^2} \quad (3.6)$$

Onde:

h = Ordem harmônica a ser filtrada;

d = Fator de dessintonia aplicada à ordem harmônica h ;

$X_{L,1}$ = Reatância indutiva do filtro;

$X_{c,1}$ = Reatância capacitiva do filtro.

O cálculo da reatância capacitiva do filtro a ser instalado é obtido através da equação 3.7.

$$(X_{L,1} - X_{c,1}) = \frac{V^2}{Q_f h} \quad (3.7)$$

Onde:

V^2 = Tensão nominal do filtro.

Em conformidade com Leão (2014), após o cálculo inicial, os valores comerciais mais próximos dos capacitores devem ser escolhidos, recalculando-se os valores dos indutores. Porém, para este trabalho, que se limita à simulação, adotou-se apenas os valores calculados, tanto para o capacitor quanto para o indutor e resistor. As equações 3.8 e 3.9 estabelecem os valores do capacitor e do indutor do filtro.

$$C_h = \frac{1}{2\pi f X_{c,1}} \quad (3.8)$$

Onde:

$X_{c,1}$ = Reatância capacitiva;

f = Frequência fundamental;

C_h = Capacitância para ordem harmônica h .

$$L_h = \frac{X_{L,1}}{2\pi f} \quad (3.9)$$

Onde:

$X_{L,1}$ = Reatância indutiva;

f = Frequência fundamental;

L_h = Indutância para ordem harmônica h .

Por último, calcula-se o valor da resistência do filtro. Segundo Leão (2014), aplica-se, para filtros harmônicos de baixa ordem, valores entre 20 e 80. Neste projeto, utilizou-se 50 como fator de qualidade. A equação 3.10 traduz o cálculo do resistor do filtro.

$$R_h = \frac{\sqrt{L_h}}{\sqrt{C_h} Q} \quad (3.10)$$

Onde:

Q = Fator de qualidade;

R_h = Resistor do filtro.

O cálculo da resistência do filtro está ligado a um valor de qualidade determinado, neste estudo, adotado como 50. (LEÃO, 2014).

De acordo com Sadiku (2008), a validação da sintonia do filtro passivo ressonante pode ser traduzida através da equação 3.11.

$$W_r = \frac{1}{\sqrt{L_h C_h}} \quad (3.11)$$

Onde:

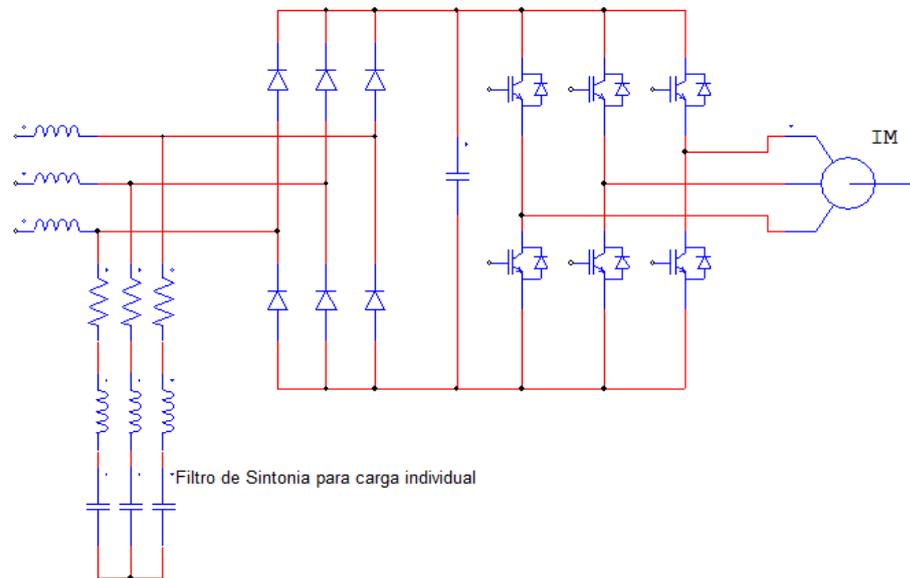
W_r = Frequência angular fundamental;

3.7.1 Local de Instalação dos Filtros

Leão (2014) indica que a localização para a instalação dos filtros deve ser sempre junto às cargas individuais geradoras de harmônicos, ou em alguma barra próxima a um conjunto de cargas não lineares ou na entrada da instalação.

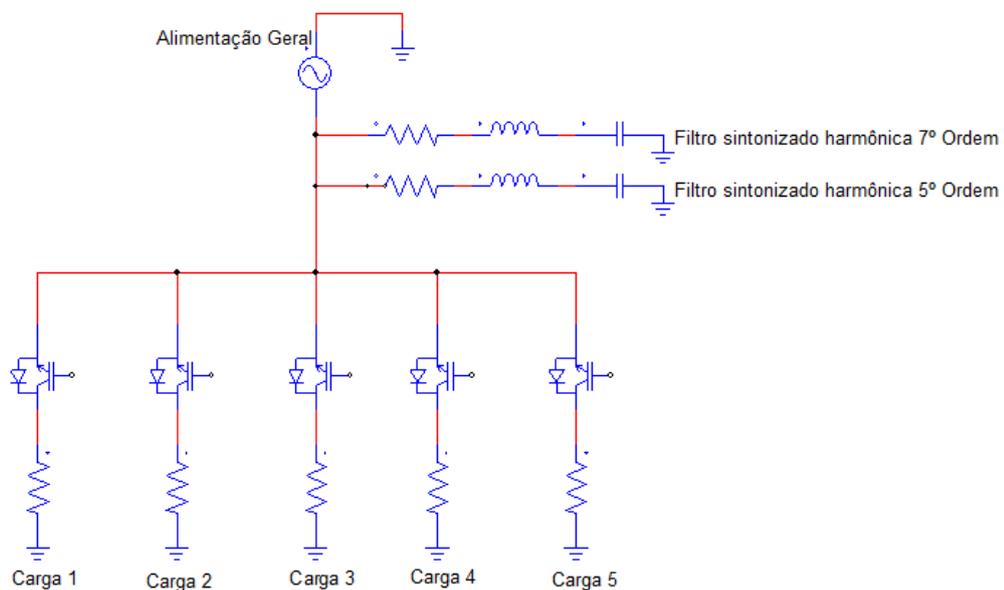
As Figuras 21 e 22 apresentam os possíveis locais para a instalação dos filtros passivos.

Figura 21 – Filtro de Sintonia Simples Instalado em paralelo a Carga



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Figura 22 – Filtro de Sintonia Instalado Centralizado



Fonte: Adaptado de Leão (2014).

Filtros passivos instalados próximos às cargas são mais eficientes na redução dos níveis de distorção harmônicos. Já os filtros instalados centralizados são mais eficientes na melhora do Fator de Potência da instalação.

A validação do local de instalação do filtro deve levar em consideração o atendimento às normas vigentes em relação aos limites de distorção harmônica total

de corrente e tensão, bem como os limites de distorção harmônica individual (LEÃO, 2014).

Em conformidade com o objetivo deste estudo, optou-se por modelar o sistema com o filtro instalado próximo às cargas, tendo em vista seu melhor desempenho na redução dos níveis de distorção harmônica nesta localização.

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o propósito de analisar a qualidade de energia na subestação SE 03, foram realizadas medições, conforme visto na Figura 19. Os dados coletados foram disponibilizados em formato de relatório e analisados conforme normas observadas neste trabalho. Foram, a partir da análise, propostas técnicas para mitigar os parâmetros que apontaram valores em desconformidade com as normas.

4.1 Escolha da Subestação, Período de Amostragem e Coleta de Dados

Para a escolha da subestação, utilizou-se o critério de maior número de alterações nas cargas nos últimos anos, sem haver uma análise criteriosa na qualidade de energia fornecida aos equipamentos. Considerou-se também, para a escolha da subestação, a maior incidência de queima de placas sem um diagnóstico preciso.

O período de coleta de dados, referente aos intervalos de registros, estão em conformidade com a IEEE-519 (2014), ou seja, o intervalo de integração dos registros (resolução) do equipamento será a cada 1 minuto, e o período de amostra será de 7 dias.

Foi programada a medição na subestação SE 03 para o mês de dezembro. A escolha da data se deu pelo fato de incluir um período de alta em relação à produção, e, com isso, todas as linhas de envase estarem com sua carga máxima apta a operar, com algumas variações, no entanto, em relação a setup para troca de produtos ou paradas para manutenções semanais.

Mesmo nos meses de alta demanda, a planta tem como boa prática a parada semanal de uma linha por dia para manutenção preventiva, ou seja, das seis linhas de produção da planta, ao menos uma sempre estará parada em um dia da semana. A SE 03, onde foi realizado o estudo, alimenta cinco dessas linhas de produção. A Figura 23 apresenta o local da instalação dos medidores.

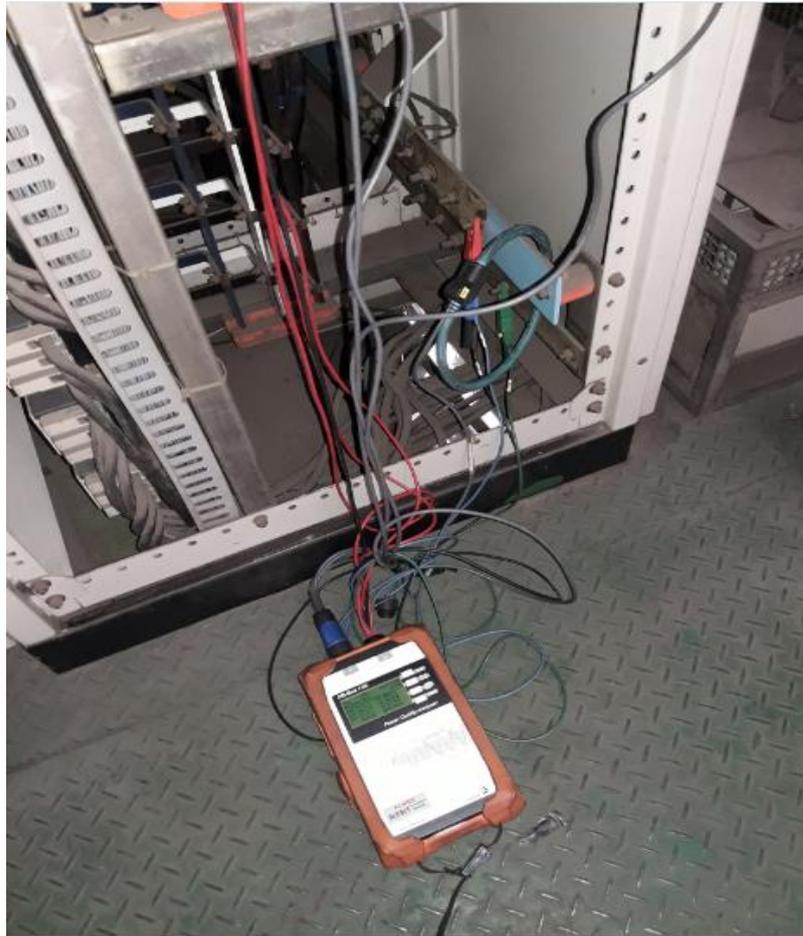
Figura 23 – SE 03



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Na Figura 23, pode ser visto o cubículo do transformador de 13,8 kV / 380 V, onde, internamente, o analisador de energia foi instalado. As Figuras 24 e 25 mostram a instalação do analisador de energia e sua ligação no barramento da subestação.

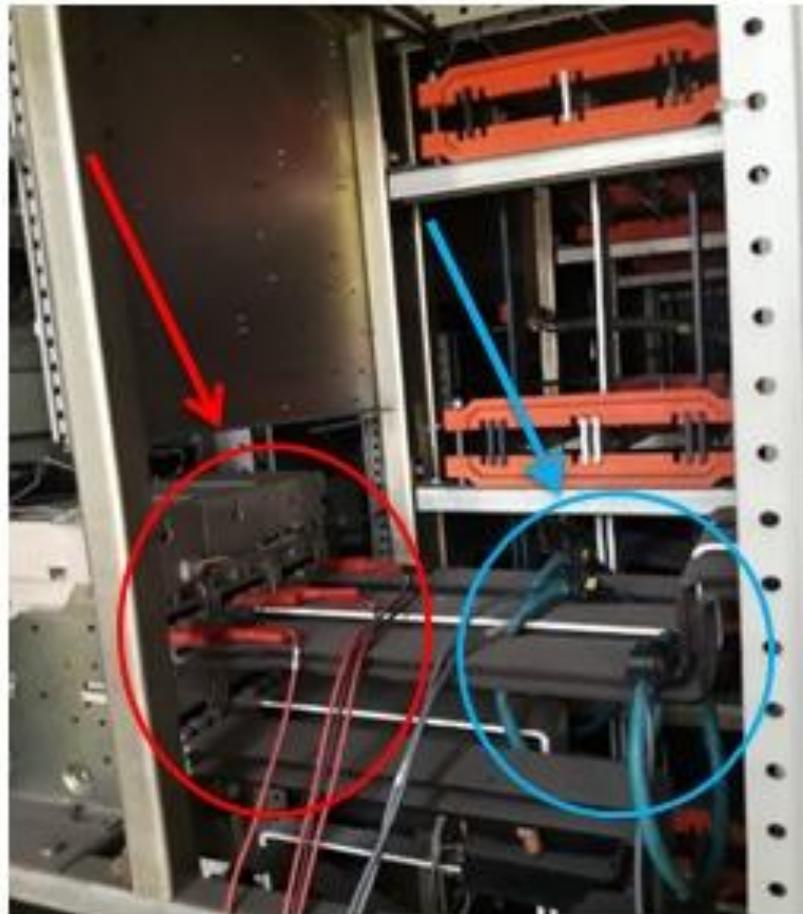
Figura 24 – Instalação do analisador de energia



Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

Na Figura 24, observa-se a lateral do cubículo aberta e o medidor de energia instalado, sendo esta atividade realizada utilizando todas as normas de segurança vigentes e por pessoal qualificado e habilitado.

Figura 25 – Ligação do medidor no barramento

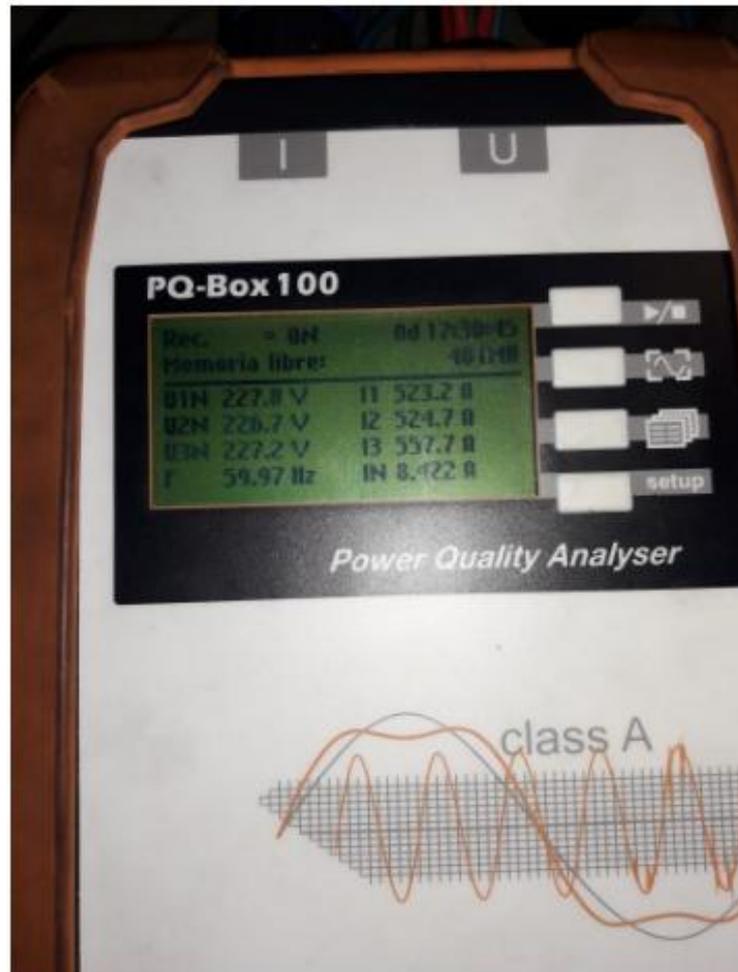


Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Conforme pode ser visto na figura 25, o alicate de tensão do analisador de energia, na cor vermelha, foi conectado nos barramentos fase e também interligado ao neutro, indicação na figura na cor vermelha. Já a garra do amperímetro foi usada sobre os cabos de baixa tensão, indicada na figura na cor azul.

Na imagem 26, pode ser visto o analisador de energia em plena operação na subestação, com valores sendo coletados.

Figura 26 – Analisador de Energia em operação



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A medição da Figura 26 foi realizada entre os períodos de 03/12/2018 às 14h43min e 10/12/2019 às 13h24min, ininterruptamente, havendo, entre as datas, algumas paradas programadas de linha, bem como paradas por falhas aleatórias e paradas para troca de produto, ou seja, ocorreram situações normais neste processo produtivo. O qualímetro registrou grandezas elétricas pelo período determinado com a integração dos registros a cada 1 minuto.

4.2 Análise dos Dados do Relatório de Qualidade

Após a coleta dos dados, foi gerado relatório, concluído no mês de janeiro de 2019. O relatório contém 22 páginas e foi registrado pela empresa contratada como Relatório de Atendimento Técnico RAT número 16915.

A descrição das atividades que foram realizadas pode ser observada conforme itens abaixo:

- análise de energia a ser realizada nos disjuntores gerais de baixa tensão da subestação 03;
- medição de potência aparente;
- medição de potência ativa;
- medição de potência reativa;
- fator de potência;
- tensão e corrente de fase;
- taxa de distorção harmônica de tensão e corrente;
- duração de 7 dias, sendo 24 horas por dia de leitura no disjuntor geral de baixa tensão.

As siglas utilizadas no relatório estão disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1 - Siglas do Relatório

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Tensão de Fase	Vf
Tensão de Linha (Fase R x S)	U12
Tensão de Linha (Fase S x T)	U23
Tensão de Linha (Fase T x R)	U31
Corrente de Fase	IL
Corrente de Neutro	IN
Potência Aparente de Fase	SL
Potência Ativa de Fase	PL
Potência Reativa de Fase	QL
Fator de Potência de Fase	PFL
Distorção Harmônica Total de Corrente	THDI
Distorção Harmônica Total de Tensão	THDL

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As medições registradas e disponíveis no relatório referem-se ao item 1.1.2 e estão expressas entre as Tabelas 2 e 7.

Tabela 2 – Tensão de Fase

MEDIÇÕES	MÍN	MÉD	MÁX	
Tensão de Fase (V)	$V_{f,1}$	217,406 V	226,464 V	230,406 V
	$V_{f,2}$	216,206 V	225,218 V	230,923 V
	$V_{f,3}$	216,960 V	225,874 V	229,694 V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Na tabela 2, pode-se verificar que os valores se encontram dentro da faixa estabelecida pelo Prodinst módulo 8 (2015), que é de 202 a 231 V.

Tabela 3 – Corrente de Fase

MEDIÇÕES		MIN	MÉD	MÁX
Corrente (I)	$I_{L,1}$	273,816 A	481,994 A	660,459 A
	$I_{L,2}$	276,249 A	484,992 A	659,988 A
	$I_{L,3}$	275,149 A	483,238 A	661,566 A

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Como visualizado na Tabela 3, as correntes medidas estão em equilíbrio, portanto, sem a necessidade de balanceamento entre as fases.

Tabela 4 – Potência Aparente

MEDIÇÕES		MIN	MÉD	MAX
Potência Aparente (S)	$S_{L,1}$	64,423 kVA	109,128 kVA	152,679 kVA
	$S_{L,2}$	65,122 kVA	109,207 kVA	152,441 kVA
	$S_{L,3}$	64,481 kVA	109,552 kVA	153,339 kVA
	S Total	194,026 kVA	327,887 kVA	458,459 kVA

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Conforme mostra a Tabela 4, o valor máximo de Potência Aparente é de 448,459 kVA, sendo que a Potência máxima do Transformador é de 750 kVA. Não há, dessa forma, risco de sobrecarga na subestação analisada.

A Tabela 5 representa os valores coletados de Potência Ativa no período em que o analisador de energia ficou instalado.

Tabela 5 - Potência Ativa

MEDIÇÕES		MIN	MÉD	MAX
Potência Ativa (P)	$P_{L,1}$	31,883 kW	103,783 kW	148,025 kW
	$P_{L,2}$	32,349 kW	103,704 kW	147,518 kW
	$P_{L,3}$	32,129 kW	102,481 kW	148,290 kW
	P Total	96,360 kVA	309,978 kW	443,833 kW

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Tabela 6 – Potência Reativa

MEDIÇÕES		MIN	MED	MAX
Potência Reativa (Q)	$Q_{L,1}$	11,674 kVAr	19,882 kVAr	31,842 kVAr
	$Q_{L,2}$	12,028 kVAr	20,316 kVAr	32,191 kVAr
	$Q_{L,3}$	11,807 kVAr	19,964 kVAr	31,784 kVAr
	Q Total	35,509 kVAr	60,162 kVAr	95,817 kVAr

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Tabela 7 – Fator de Potência

MEDIÇÕES		MIN	MED	MAX
Fator de Potência (FP)	$FP_{L,1}$ (15min)	0,817	0,977	0,991
	$FP_{L,2}$ (15min)	0,801	0,974	0,989
	$FP_{L,3}$ (15min)	0,841	0,98	0,992
	FP Total (15min)	0,819	0,976	0,99

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

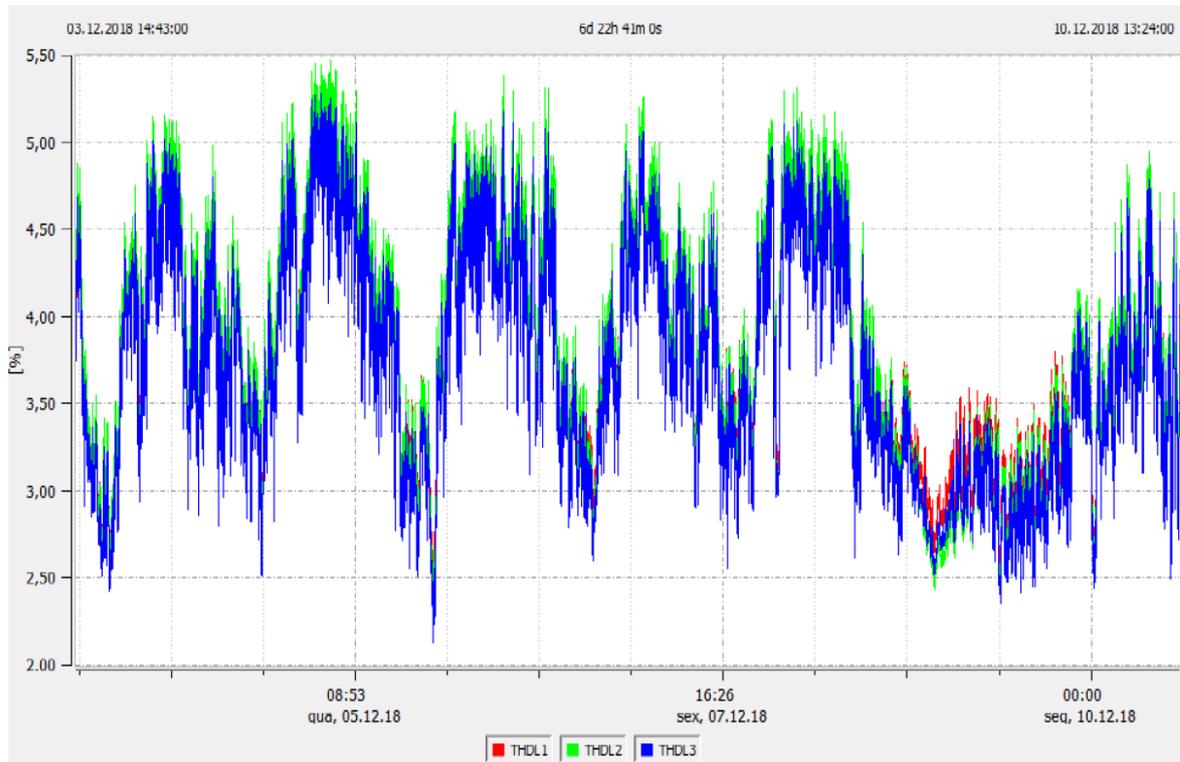
Como pode ser visto na Tabela 7, o Fator de Potência mínimo registrado encontra-se abaixo dos valores especificados no Módulo 8 do PRODIST (2015). Porém, na média, os valores coletados no período estão acima do especificado, que é 0,92.

Na análise dos dados do relatório referentes ao item 1.1.2, e levando em consideração ao objetivo do trabalho, foram analisadas as taxas de distorção harmônica de total de tensão e de distorção harmônica de corrente mais detalhadamente.

4.2.1 Análise distorção harmônica de tensão

A análise da distorção harmônica de tensão oriunda do relatório é baseada no Módulo 8 do PRODIST (2015), o qual define os valores de referência e os parâmetros relativos à conformidade de tensão em regime permanente (LEÃO, 2014).

Na Figura 27, apresenta-se o gráfico da medição da distorção harmônica total de tensão THD_V .

Figura 27 – Gráfico da THD_v 

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

No gráfico da Figura 27, a cor vermelha representa a leitura da fase 1, na cor verde, há a representação da leitura na fase 2 e na cor azul é representada a leitura da fase 3. Na parte superior, lado direito, é indicada a data e o horário do início da coleta dos dados e, na parte esquerda, a data e horário do término da coleta, ou seja, do dia 03/12/2018 às 14:43 ao dia 10/12/2018 às 13:24, podendo ser observado, no centro, o tempo total da análise.

No eixo das ordenadas, está representada, pelos valores de porcentagem, a variação do gráfico. Já no eixo das abscissas, representa-se o deslocamento do tempo da coleta.

A Tabela 8 apresenta os valores mínimo, médio e máximo observados.

Tabela 8 – Distorção Harmônica Total de Tensão

MEDIÇÕES		MIN	MED	MAX
Distorção	THD_vL1	2,31%	3,82%	5,27%
Harmônico Total de	THD_vL2	2,20%	3,85%	5,47%
Tensão (THD_v)	THD_vL3	2,13%	3,72%	5,28%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Conforme análise da Tabela 8, os valores de distorção de harmônico total de tensão, registrados no período da medição, estão abaixo do limite máximo de 10% estabelecidos pelo Prodist módulo 8 para $V_n \leq 1,0$ kV, no qual a tensão nominal da subestação se enquadra.

A Tabela 9 mostra distorção individual de harmônico de tensão, coletada pelo analisador de energia.

Tabela 9 – Distorção individual de harmônico de tensão

h	L1 - Max [V]	L2 - Max [V]	L3 - Max [V]
2	0,08	0,017	0,09
3	0,16	0,28	0,41
4	0,06	0,05	0,6
5	2,96	2,11	2,95
6	0,11	0,06	0,07
7	2,89	2,68	2,74
8	0,06	0,05	0,04
9	0,32	0,2	0,54
10	0,05	0,04	0,04
11	3,03	3,41	2,96
12	0,05	0,04	0,03
13	2,1	1,85	2,08
14	0,02	0,02	0,02
15	0,31	0,19	0,27
16	0,01	0,01	0,01
17	0,36	0,44	0,4
18	0,01	0,01	0,01
19	0,49	0,44	0,47
20	0,01	0,01	0,01
21	0,09	0,44	0,09
22	0,01	0,01	0,01
23	0,17	0,07	0,21
24	0,01	0,01	0,01
25	0,14	0,22	0,15

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Na Tabela 9, h refere-se à ordem harmônica, já L_1 , L_2 e L_3 correspondem às medições realizadas nas fases do transformador da SE 03.

Tendo em vista os valores coletados e apresentados no relatório, depois de realizada a comparação com os dados do Quadro 6, que trata da referência para distorção harmônica total de tensão, e com o Quadro 7, que limita os valores de distorção harmônica individuais, conclui-se que a subestação estudada encontra-se

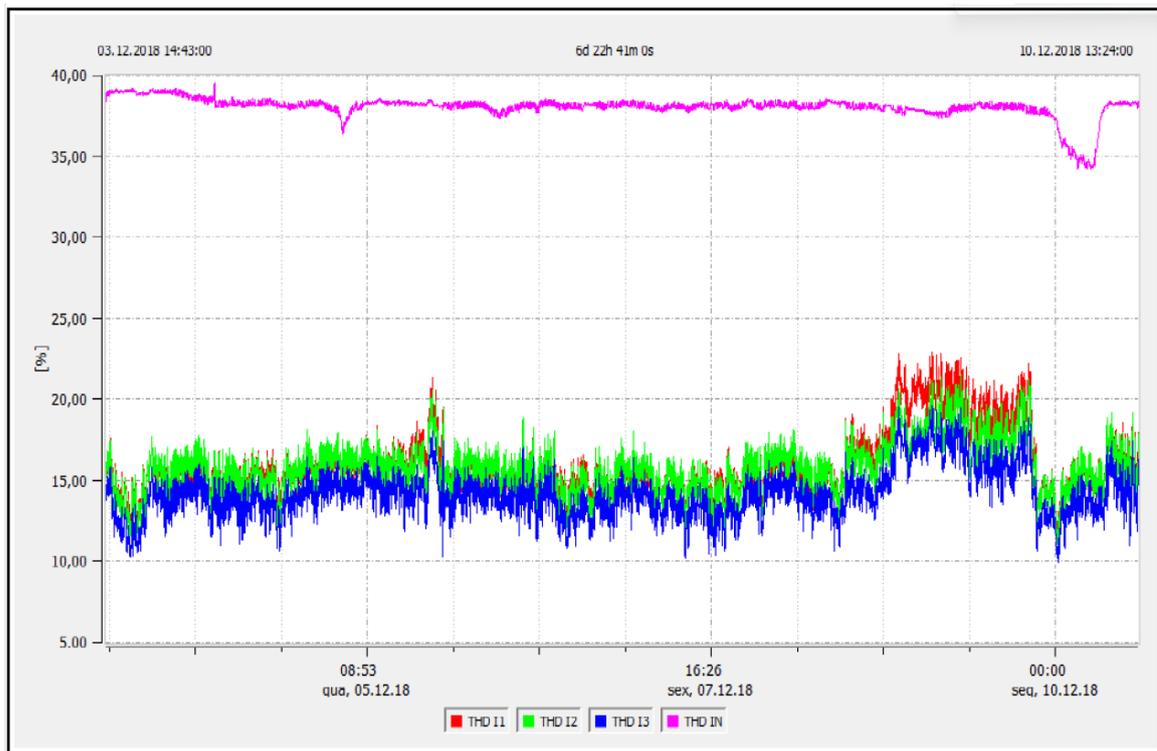
dentro dos padrões vigentes para a distorção harmônica individual e distorção harmônica total de tensão.

4.2.2 Análise da distorção harmônica de corrente

A norma IEEE-519 (2014) será a balizadora para a comparação com os valores da distorção harmônica total de corrente coletados. A classificação dos limites de distorção harmônica total de corrente pode ser feita de duas maneiras: pela tensão nominal dos circuitos ou pela ordem harmônica individual. (LEÃO, 2014).

Na Figura 28, apresenta-se o gráfico da distorção harmônica total de corrente THD_i verificado durante o período de amostragem.

Figura 28 – Gráfico da THD_i



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

No gráfico da Figura 28, a cor vermelha representa a leitura da fase 1, na cor verde, é vista a representação da leitura na fase 2 e na cor azul é representada a leitura da fase 3. Já, na cor rosa, é representada a leitura no neutro. Na parte superior, lado direito, indica-se a data e o horário do início da coleta dos dados e, na

parte esquerda, é indicada a data e o horário do término da coleta, ou seja, do dia 03/12/2018 às 14:43 ao 10/12/2018 às 13:24. No centro, pode ser visto o tempo total da análise.

O eixo das ordenadas representa a unidade de medida da distorção harmônica em termos percentuais. Já no eixo das abscissas, está representado o deslocamento do tempo da coleta.

A Tabela 10 apresenta os valores mínimo, médio e máximo da distorção harmônica de corrente coletado.

Tabela 10 – Distorção Harmônico Total de Corrente

MEDIÇÕES		MÍN	MÉD	MÁX
Distorção Harmônico Total de Tensão (THD_i)	$THD_{i,L1}$	11,50%	16,02%	22,92%
	$THD_{i,L2}$	11,07%	15,73%	21,52%
	$THD_{i,L3}$	10,97%	14,17%	20,65%
	$THD_{i,N}$	34,19%	38,04%	39,53%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A distorção harmônica total de corrente no neutro, $THD_{i,N}$, corresponde a soma das componentes harmônicas de 3ª ordem e seus múltiplos da fase 1 com as respectivas componentes harmônicas de 3ª ordem e seus múltiplos das fases 2 e 3 que estão em fase (LEÃO, 2014).

Conforme verifica-se na Tabela 10, a distorção harmônica total de corrente THD_i registrada no período da medição encontra-se fora do especificado pela norma IEEE-519 (2014).

A Tabela 11 mostra distorção individual de harmônico de corrente gerada no relatório pelo analisador de energia.

Tabela 11 – Distorção individual de harmônico de Corrente

h	L1 - Max [I]	L2 - Max [I]	L3 - Max [I]
2	1,11	0,74	1,36
3	8,89	8,18	8,02
4	0,29	0,42	0,36
5	16,64	14,89	12,44
6	0,21	0,16	0,17
7	18,3	14,34	14,81
8	0,25	0,2	0,18
9	1,4	2,03	2,53
10	0,23	0,19	0,17
11	16,06	12,54	12,41
12	0,25	0,17	0,16
13	12,05	6,92	6,35
14	0,13	0,09	0,12
15	0,92	1,14	0,69
16	0,06	0,07	0,07
17	1,46	1,55	1,44
18	0,05	0,04	0,04
19	1,07	0,88	0,9
20	0,03	0,04	0,03
21	0,35	0,24	0,29
22	0,03	0,03	0,03
23	0,42	0,59	0,51
24	0,02	0,02	0,02
25	0,45	0,45	0,33

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Na Tabela 11, h refere-se à ordem harmônica, já L_1 , L_2 e L_3 correspondem às medições realizadas nas fases do transformador da SE 03.

Tendo em vista os valores coletados e apresentados no relatório e, a *posteriori*, a comparação com a norma IEEE-519 (2014), conclui-se que a subestação estudada encontra-se com os parâmetros de distorção harmônica total de corrente acima do valor especificado no Quadro 8, ou seja, acima de 8%. Da mesma forma, os valores das distorções harmônicas individuais de corrente das ordens 3^a, 5^a, 7^a estão acima de 7% e das ordens 11^a e 13^a acima de 3,5% conforme estabelecido no Quadro 8. Conclui-se, também, que todos os valores analisados apresentam coerência entre eles e, com isso, é validada a coleta dos dados.

4.3 Modelagem do sistema

Com os valores já coletados, analisados e validados, a próxima etapa é a modelagem do sistema.

Para a modelagem, foi necessária a escolha de um cenário para aplicação de técnicas a fim de mitigar a distorção harmônica de corrente. O cenário escolhido foi o de maior distorção harmônica total de corrente, que corresponde a 22,92% de distorção na Fase 1. Como a carga está equilibrada, *a posteriori*, a mesma modelagem da fase 1 servirá para as fases 2 e 3. A Tabela 12 apresenta os valores extraídos do relatório, que terão relevância para a modelagem do sistema.

Tabela 12 – Parâmetros Extraídos do relatório

Grandeza	Extraído do relatório
$THD_{i,L1}$	22,9 %
$FP_{L,1}$	0,91
$Q_{L,1}$	22 kvar
$P_{L,1}$	50 kW
$S_{L,1}$	55 kVA
$I_{L,1}$	230 A
$V_{f,1}$	235 V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Para o cálculo do ângulo da impedância da carga, utilizou-se o valor do fator de potência de 0,91 e aplicou-se a equação 3.1.

$$FP = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3.1)$$

$$(\theta_v - \theta_i) = 24,49^\circ$$

O ângulo $24,49^\circ$, extraído da equação 3.1, é o ângulo da impedância. Com o ângulo da impedância calculado, utiliza-se a equação 3.2 para encontrar a impedância da carga.

O resultado da equação 3.2 define $R_L = 0,899\Omega$ e $X_L = 0,4235\Omega$.

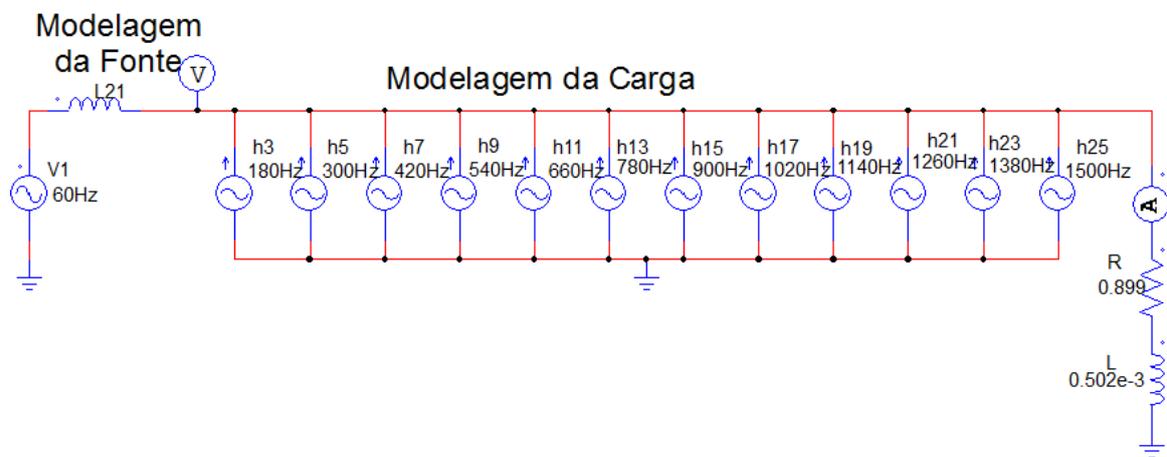
Com o valor encontrado da reatância indutiva da carga, e utilizando a equação 3.9, encontra-se da indutância correspondente.

Para a frequência fundamental $f = 60\text{ Hz}$ e a para reatância indutiva de $X_L = 0,4235\Omega$, foi encontrado o valor da indutância de $L = 0,502\text{ mH}$.

A modelagem da carga ficou com os seguintes valores: $R_L = 0,899\Omega$ e $L = 0,502\text{ mH}$.

A parcela não linear da carga, por sua vez, foi modelada como fontes de correntes alternadas na respectiva frequência de cada harmônica, sendo que a amplitude de cada uma dessas fontes foi parametrizada conforme os valores individuais de distorção harmônica presentes na coluna L1 da Tabela 11. A Figura 29 apresenta o sistema modelado.

Figura 29 – Sistema Modelado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 29 apresenta a modelagem do sistema implementado no Software PSIM. As fontes de alimentação disponíveis no software são ideais. Com isso, foi necessária a inserção da impedância da alimentação através de L_{21} .

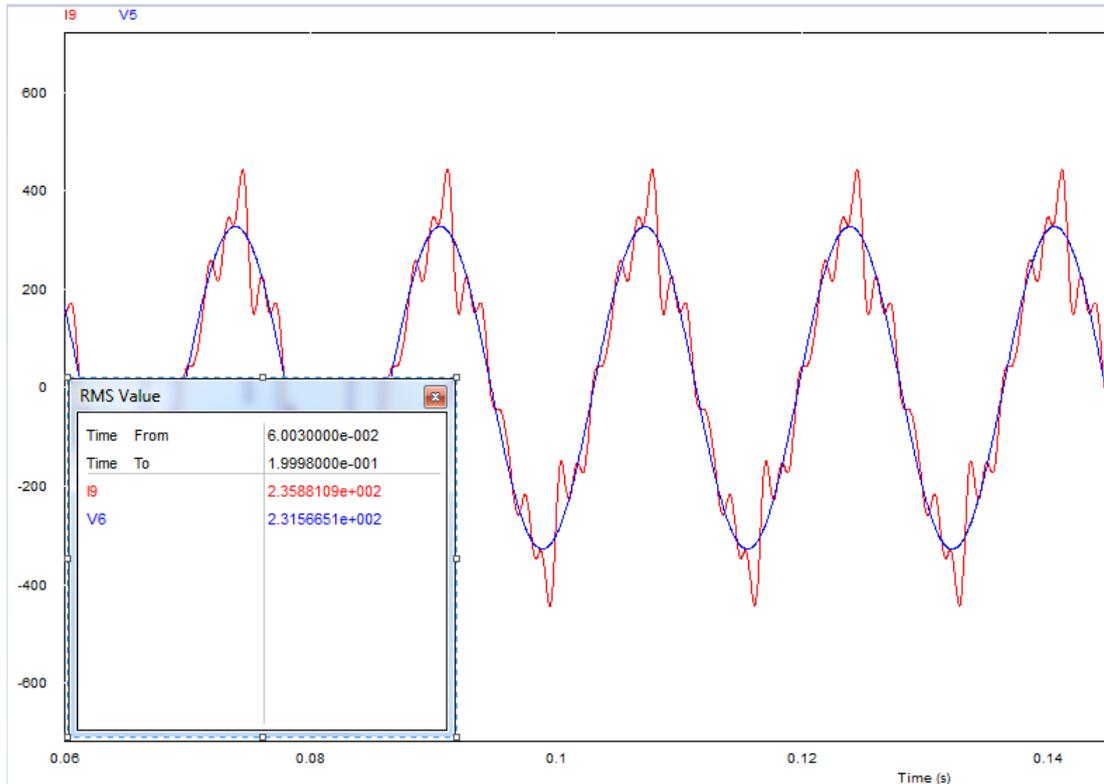
Neste íterim, Paulilo (2013) diz que as harmônicas de ordem ímpares são as principais causadoras das distorções na forma de onda senoidal. Portanto, as ordens harmônicas utilizadas na modelagem do sistema foram da 3ª até a 25ª, todas ímpares, usando como referência de amplitude a Tabela 11.

4.4 Simulação do Sistema Modelado

A simulação do modelo apresentado na Figura 29 validará os cálculos para a modelagem do sistema, e os resultados serão analisados e comparados com os valores reais gerados no relatório da SE 03.

A Figura 30 representa o gráfico da simulação da carga que foi modelada na Figura 29.

Figura 30 – Simulação do Sistema Modelado com Amplitude da Tensão e Corrente



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Na Figura 30 pode-se verificar que a tensão e a corrente RMS na carga estão bem próximas às apresentadas no relatório. A Tabela 13 compara os valores coletados e apresentados no relatório com os valores simulados.

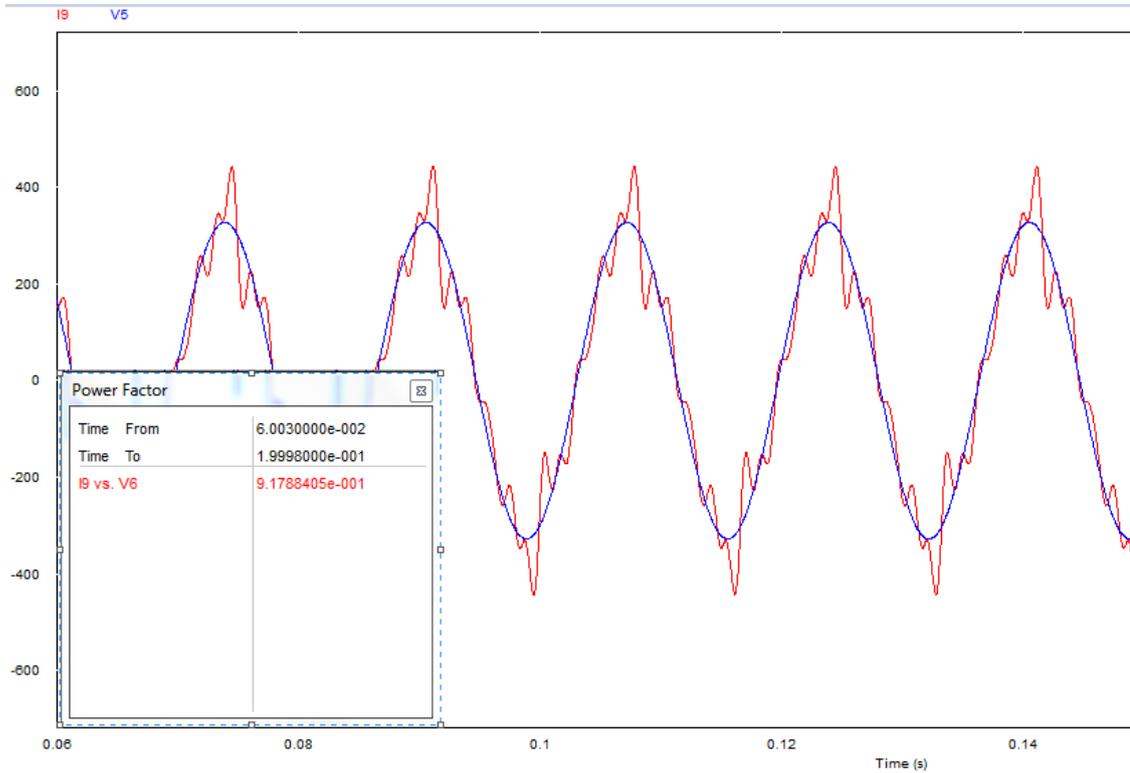
Tabela 13 – Comparação entre valores reais e simulados de Tensão e Corrente

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Relatório X modelagem do Sistema
$I_{L,1}$	230 A	235,8 A	103,0%
$V_{f,1}$	235 V	231,5 V	99,0%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

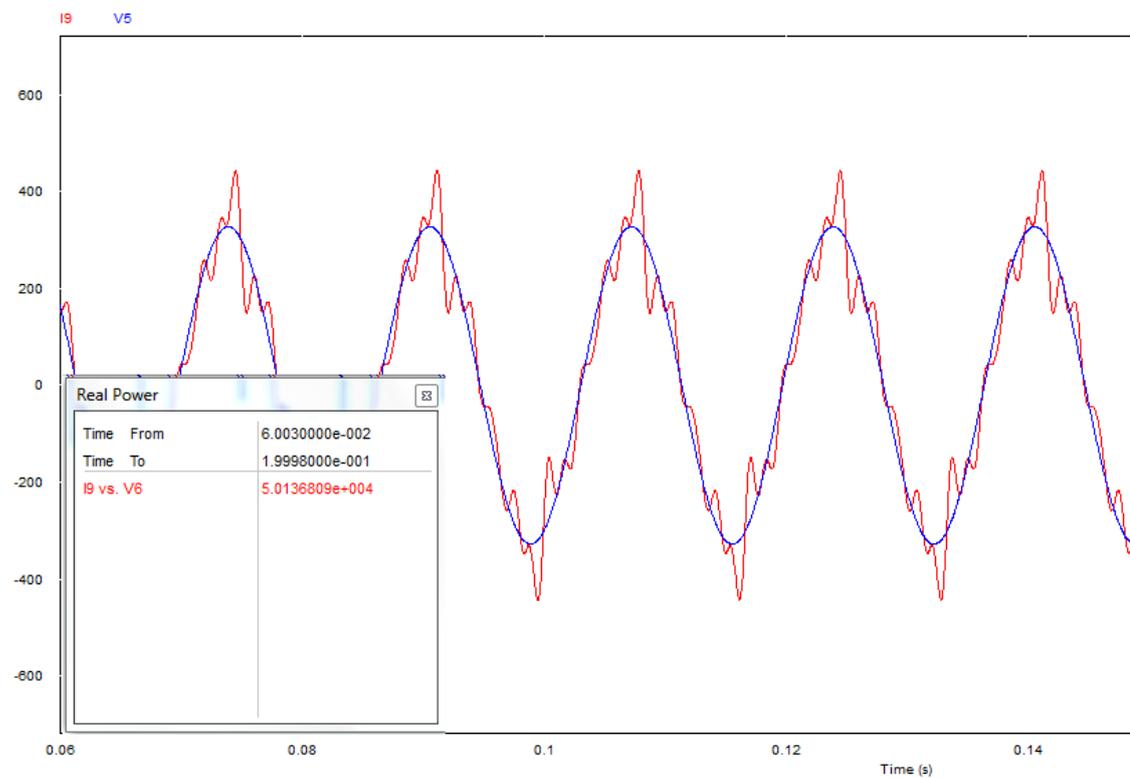
As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os valores simulados do Fator de potência, Potência Ativa e Potência Aparente, respectivamente.

Figura 31 – Simulação do Sistema Modelado do Fator de Potência



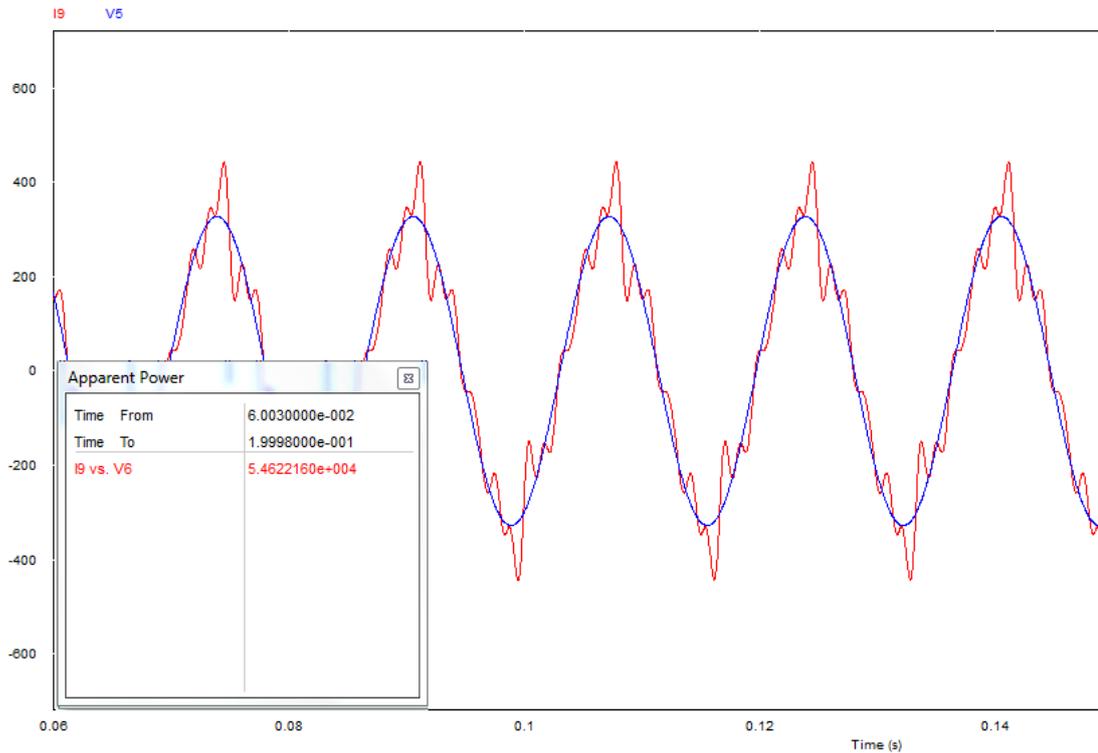
Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 32 – Simulação do Sistema Modelado da Potência Ativa



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 33 – Simulação do Sistema Modelado da Potência Aparente



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os valores apresentados nas Figuras 31, 32 e 33 referentes ao Fator de Potência, Potência Ativa e Potência Aparente ficaram muito próximos aos valores coletados na subestação SE 03. A Tabela 14 mostra a comparação entre os valores.

Tabela 14 – Comparação entre valores reais e simulados de FP, P e S.

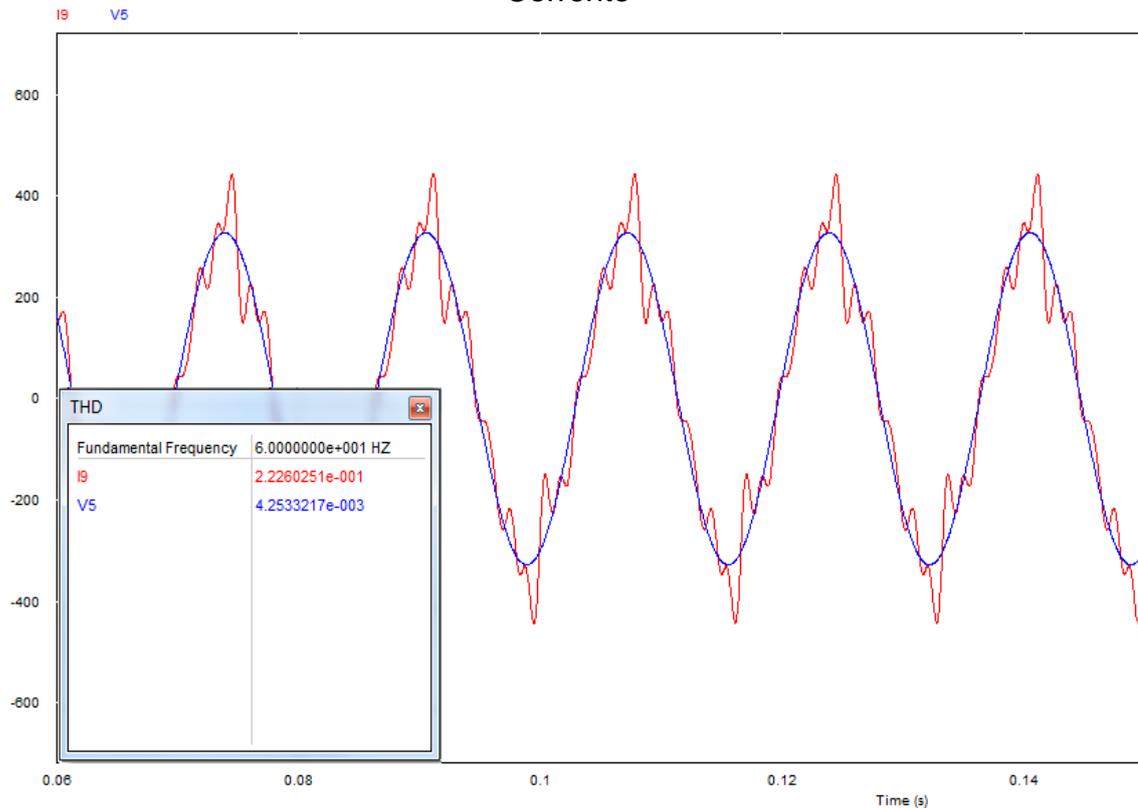
Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Relatório X modelagem do Sistema
$FP_{L,1}$	0,91	0,91	100,0%
$P_{L,1}$	50 kW	50,13 kW	100,3%
$S_{L,1}$	55 kVA	54,81 kVA	99,7%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

De acordo com a Tabela 14, os valores extraídos do relatório e os valores obtidos através do modelo no software PSIM são muito próximos.

Por último, na Figura 34, pode-se observar o gráfico da distorção harmônica total de corrente, a $THD_{i,L1}$.

Figura 34 – Simulação do Sistema Modelado da Distorção Harmônica Total da Corrente



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 34 mostra uma distorção harmônica total de corrente no valor de 22,26%, muito próximo ao valor medido na subestação. A Tabela 15 realiza a comparação entre os valores reais e os valores simulados.

Tabela 15 – Comparação entre valores reais e simulados de THD_i

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Relatório X modelagem do Sistema
$THD_{i,L1}$	22,9 %	22,26%	97,3%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A comparação entre os valores reais e simulados na Tabela 15 mostra que a distorção total de harmônico de corrente está muito aproximada ao valor real. A Tabela 16 mostra o apanhado dos valores reais e simulados.

Tabela 16 – Comparação Geral dos Valores Reais e Simulados

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Relatório X modelagem do Sistema
$THD_{i,L1}$	22,9 %	22,26 %	97,3%
$FP_{L,1}$	0,91	0,91	100,0%
$P_{L,1}$	50 kW	50,13 kW	100,3%
$S_{L,1}$	55 kVA	54,81 kVA	99,7%
$I_{L,1}$	230 A	235,80 A	103,1%
$V_{f,1}$	235 V	231,50 V	99,2%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Por meio da comparação realizada entre o modelo de carga proposto e os dados coletados da carga real, entre as Tabelas 13 e 16, conclui-se que a modelagem do sistema apresenta-se satisfatória, podendo ser implementadas, no modelo, as devidas técnicas para a adequação da distorção harmônica total de corrente THD_i que encontra-se fora da especificação da norma IEEE-519/2014.

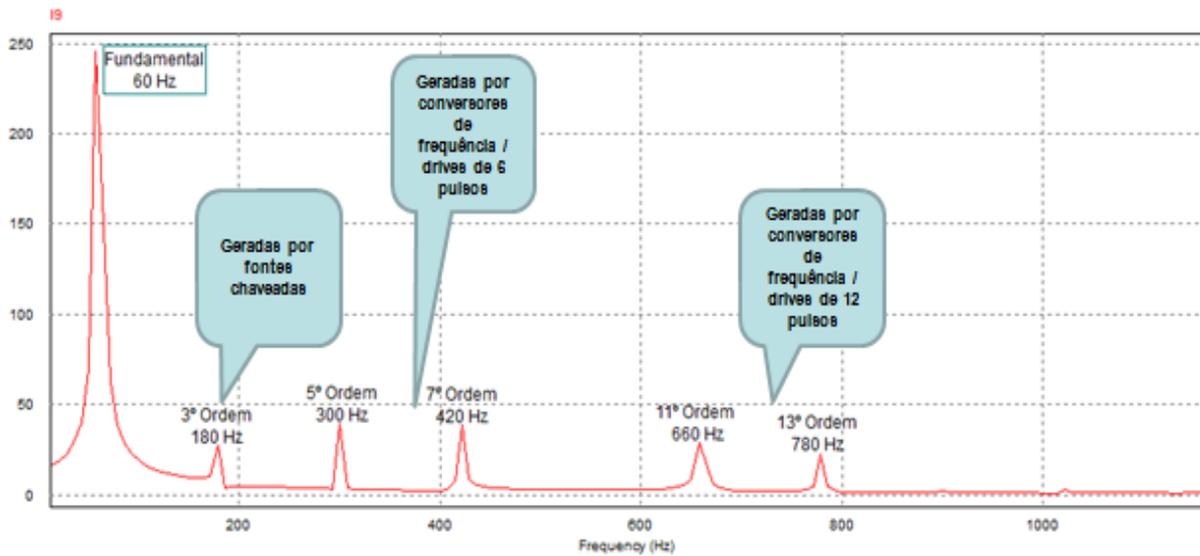
4.5 Projeto e Simulação para Filtro de Distorção Harmônica de Corrente

Quando as distorções harmônicas de tensão e correntes ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas vigentes, devem ser utilizadas técnicas para a mitigação desse distúrbio. (LEÃO, 2014).

A técnica escolhida para a mitigação da distorção harmônica de corrente, que está com valor acima do estabelecido pela IEEE-519, foi adição de filtro passivo de sintonia simples para drenar as correntes harmônicas.

Segundo Leão (2014), os filtros passivos de sintonia simples são os mais utilizados quando há necessidade de drenar uma ordem harmônica específica. Também têm grande eficiência na filtragem de frequências específicas. A Figura 35 mostra o espectro harmônico da simulação do sistema modelado.

Figura 35 – Gráfico do espectro harmônico da carga modelada



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 35 traz os valores, no eixo das ordenadas, em Ampere e, no eixo das abscissas, os relativos à frequência. Pode-se observar que as correntes a serem drenadas correspondem aos valores das correntes que estão na Tabela 11, que mostra a distorção individual de harmônico de corrente, geradas no relatório pelo analisador de energia.

A partir da definição de utilização do filtro passivo ressonante simples como técnica para a redução da distorção harmônica, será proposto filtro para as harmônicas individuais que ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma até a distorção total atingir níveis dentro do estabelecido.

4.5.1 Cálculo do filtro para harmônica de 3ª ordem

O primeiro passo para o cálculo do filtro é o dimensionamento da potência reativa do filtro. Sabendo-se que a determinação da potência reativa total do banco de filtros será de 30Kvar, utiliza-se a equação 3.5 para calcular a potência reativa do filtro para 3ª ordem.

Sabendo que $Q_{com} = 30$ kvar e o valor de I_h referente a 3ª harmônica foi extraído da Tabela 11, encontrou-se o valor da potência reativa do filtro $Q_{180} = 4,426$ kvar.

A próxima etapa é calcular as reatâncias capacitivas e indutivas do filtro. Para isso, utiliza-se as equações 3.6 e 3.7.

Os valores encontrados foram, $X_{c,1} = 36,99 \Omega$ e $X_{L,1} = 4,3686 \Omega$.

Com os valores das reatâncias do filtro encontradas, parte-se para os cálculos da indutância e capacitância do filtro, utilizando-se, para tanto, as equações 3.8 e 3.9.

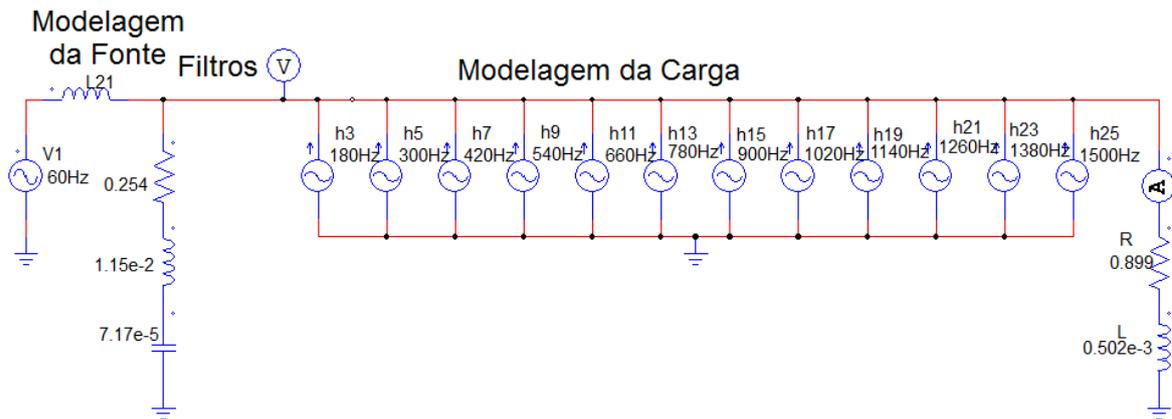
Realizando as substituições dos valores de $X_{c,1}$ e $X_{L,1}$, encontrou-se os valores de $C = 0,0000717 \text{ F}$ e $L = 0,01158 \text{ H}$ para a 3ª harmônica.

Com os valores do capacitor e do indutor encontrados, pode-se encontrar o resistor através da equação 3.10.

Onde utilizou-se o valor para o fator de qualidade $Q = 50$, o valor encontrado é $R = 0,254\Omega$.

A Figura 36 mostra os elementos calculados no circuito modelado.

Figura 36 – Modelagem do sistema com filtro de 3º Ordem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 36 indica o filtro instalado próximo à carga. Segundo Leão (2014), filtros instalados próximos às cargas são mais eficientes na redução dos níveis de distorção harmônicos. A Tabela 17 mostra os valores encontrados com a instalação do filtro de 3ª ordem.

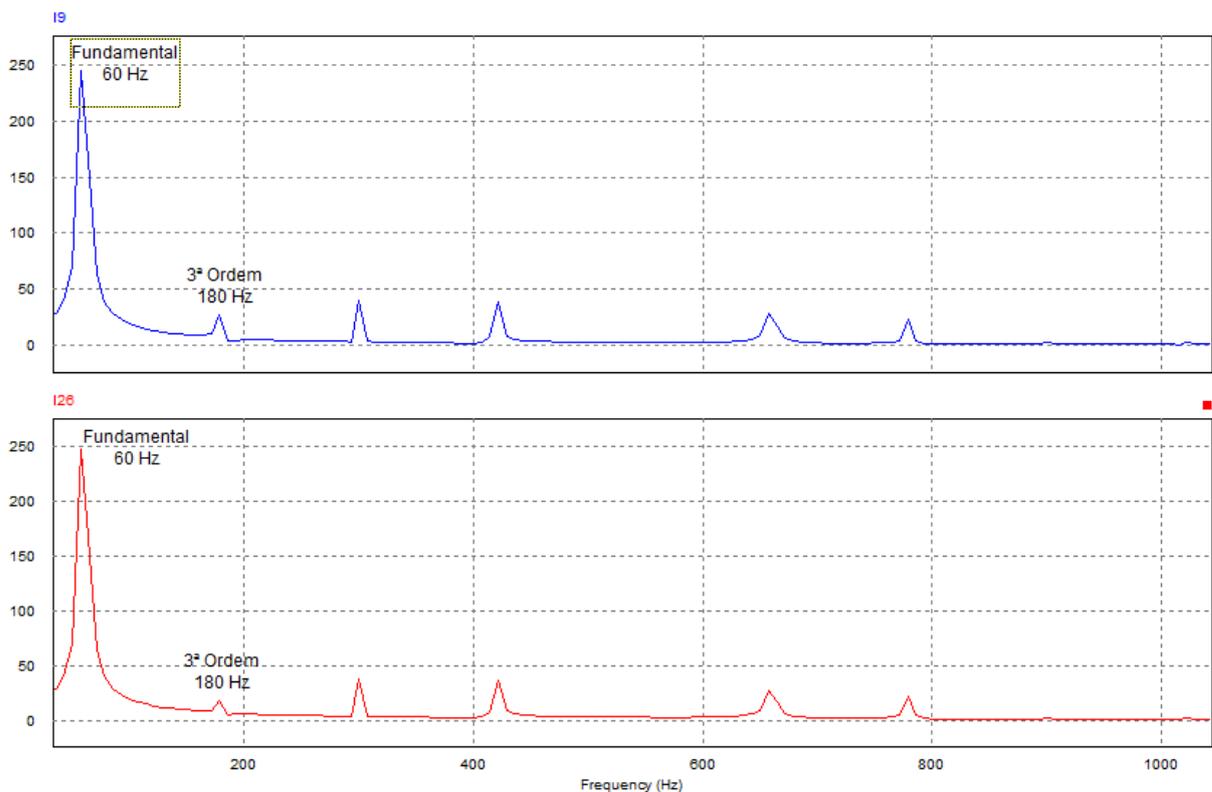
Tabela 17 – Valores simulados para filtro de 3ª ordem

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Simulado com Filtro 3º Ordem
$THD_{i,L1}$	22,9 %	22,26 %	20,07 %
$FP_{L,1}$	0,91	0,91	0,923
$P_{L,1}$	50 kW	50,13 kW	50,87 kW
$S_{L,1}$	55 kVA	54,81 kVA	55,05 kVA
$I_{L,1}$	230 A	235,80 A	237,67 A
$V_{f,1}$	235 V	231,50 V	231,68 V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com pode ser verificado, a instalação do filtro de 3ª ordem reduziu a distorção harmônica em aproximadamente 10%, encontrando-se, o fator de potência, acima do limite estabelecido pelo PRODIST. Contudo, a simulação apresentou pouca variação nas outras grandezas. A Figura 37 traz a comparação entre o sistema modelado sem a adição do filtro (gráfico azul) e com a adição do filtro (gráfico vermelho).

Figura 37 – Espectro com e sem filtro de 3ª harmônica



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Como pode ser visto na Figura 37, a adição do filtro reduziu o espectro da 3ª harmônica, fato também observado na Tabela 17.

4.5.2 Cálculo do filtro para harmônica de 5ª ordem

A metodologia de cálculo do filtro de 5ª ordem é análoga à do filtro de 3ª ordem.

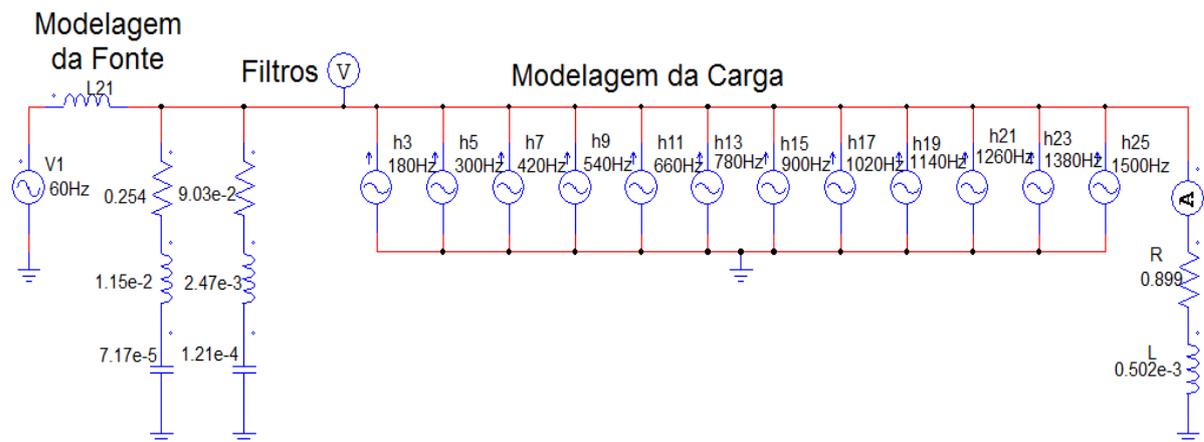
Os valores encontrados nas etapas de cálculo do filtro de 5ª ordem são apresentados na Tabela 18, e a adição do filtro no circuito modelado é apresentada na Figura 38.

Tabela 18 – Valores do filtro de 5ª ordem

Grandezas	Valores calculados
Q_f	6,885 Kvar
$X_{C,1}$	21,906 Ω
$X_{L,1}$	0,931 Ω
L_h	0,00247 H
C_h	0,000121 F
R_h	0,0903 Ω

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Figura 38 – Modelagem do sistema com filtro de 5ª Ordem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com a adição do filtro de 5ª harmônica, conforme mostra a Figura 38, os valores obtidos na simulação são expostos na Tabela 19.

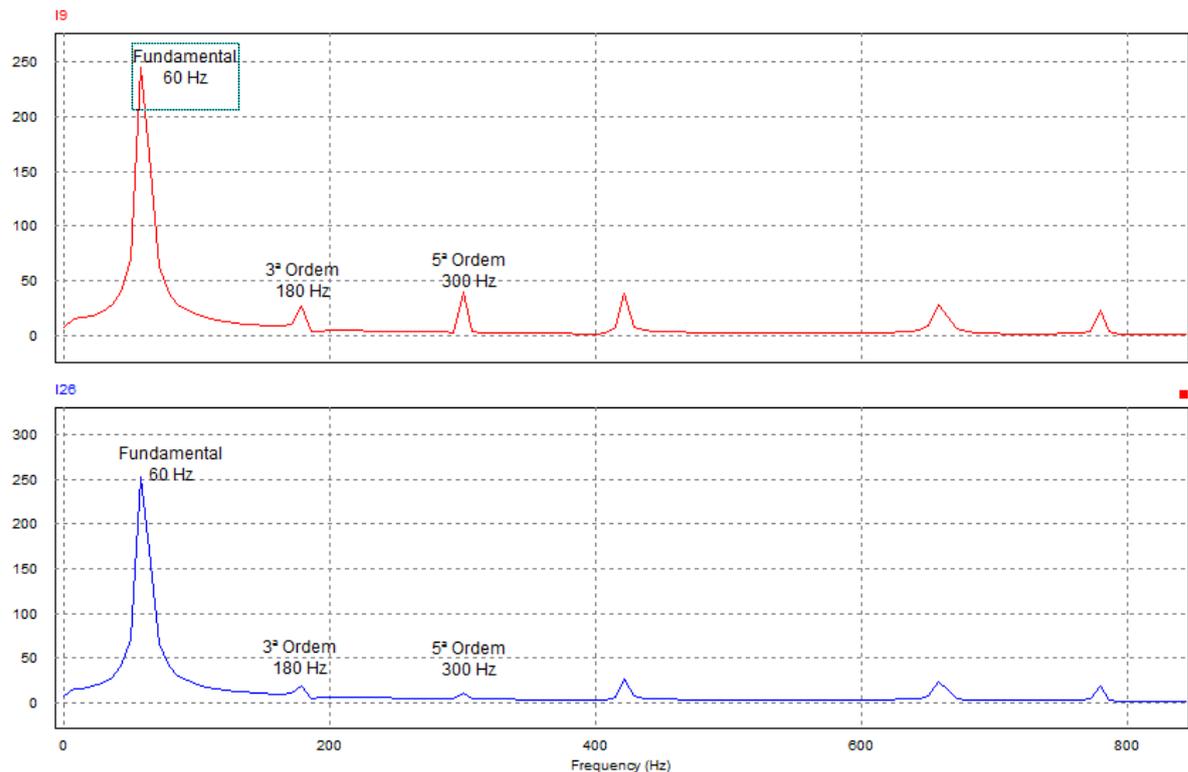
Tabela 19 – Valores simulados para filtro de 5ª ordem

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Simulado com Filtro 5º Ordem
$THD_{i,L1}$	22,9 %	22,26 %	13,5 %
$FP_{L,1}$	0,91	0,91	0,94
$P_{L,1}$	50 kW	50,13 kW	51,58 kW
$S_{L,1}$	55 kVA	54,81 kVA	54,53 kVA
$I_{L,1}$	230 A	235,80 A	239,2 A
$V_{f,1}$	235 V	231,50 V	227,8 V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com a adição dos filtros harmônicos de 3ª e 5ª ordem, a redução na distorção harmônica total de corrente foi significativa, apresentando uma diminuição de aproximadamente 40%, e uma significativa elevação do fator de potência. Os outros parâmetros sofreram poucas alterações. A Figura 39 mostra a comparação do espectro harmônico com a instalação do filtro para 5ª ordem harmônica.

Figura 39 – Espectro com filtro de 5º harmônica



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

O filtro da 5ª harmônica se mostrou eficaz, pois reduziu o espectro da referida ordem consideravelmente, pois, na Figura 39, o espectro em azul representa a adição do filtro, já o espectro vermelho representa o sistema modelado e simulado sem o filtro, fato também observado nos valores da tabela 19.

4.5.3 Cálculo do filtro para harmônica de 7ª ordem

Os cálculos para encontrar as grandezas do filtro de 7ª ordem serão análogos com aos cálculos do filtro de 5ª ordem. Os valores encontrados nas etapas são apresentados na Tabela 20.

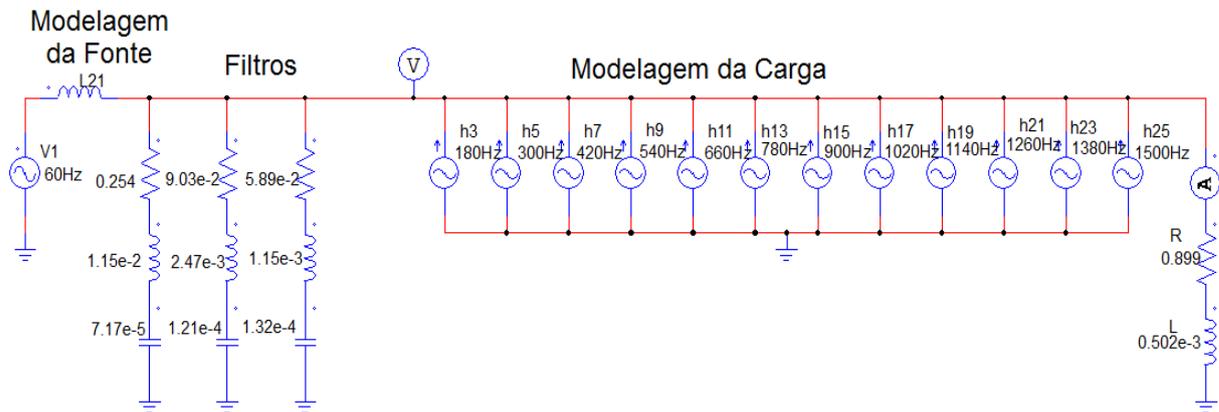
Tabela 20 – Valores do filtro de 7ª ordem

Grandezas	Valores calculados
Q_f	7,377 Kvar
$X_{C,1}$	20,008 Ω
$X_{L,1}$	0,434 Ω
L_h	0,00151 H
C_h	0,0001325 F
R_h	0,0589 Ω

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Após todos os elementos calculados, a Figura 40 mostra o filtro introduzido no circuito modelado.

Figura 40 – Modelagem do sistema com filtro de 7ª Ordem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A adição do filtro de 7ª ordem em paralelo com os de 3ª e 5ª trouxe resultados apresentados na Tabela 21.

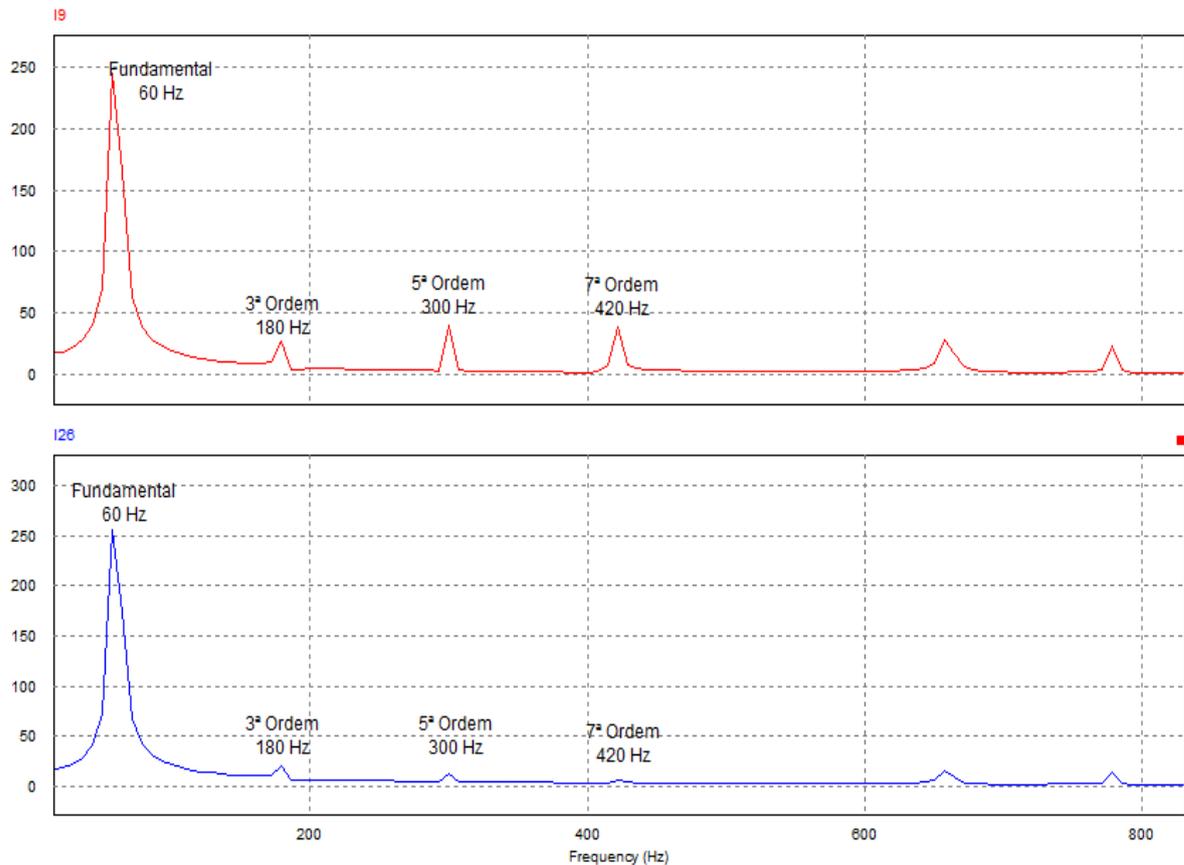
Tabela 21 – Valores simulados para filtro de 7ª ordem

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Simulado com Filtro 7ª Ordem
$THD_{i,L1}$	22,9 %	22,26 %	7,96 %
$FP_{L,1}$	0,91	0,91	0,96
$P_{L,1}$	50 kW	50,13 kW	52,94 kW
$S_{L,1}$	55 kVA	54,81 kVA	54,79 kVA
$I_{L,1}$	230 A	235,80 A	242,4 A
$V_{f,1}$	235 V	231,50 V	226,05 V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com a instalação dos filtros harmônicos de 3ª, 5ª e 7ª ordem, o valor da distorção harmônica total de corrente encontra-se dentro do especificado pela norma IEEE-519 (2014) apresentado no Quadro 8, mostrando a eficiência dos filtros instalados. A figura 41 representa a comparação entre o espectro harmônico sem o filtro de 7ª ordem na cor vermelha e com o filtro de 7ª ordem na cor azul.

Figura 41 – Espectro com filtro de 7ª harmônica



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A inserção do filtro harmônico de 7ª ordem mostrou-se de grande eficácia, pois, como visto na Figura 41, o espectro harmônico da referida ordem praticamente inexistente. Além disso, a adição dos três filtros proporcionou a adequação às normas vigentes da distorção harmônica total de corrente do sistema modelado.

4.5.4 Cálculo do filtro para harmônica de 11ª ordem

O filtro da 11ª ordem harmônica será calculado nos mesmos critérios dos anteriores, e os valores serão expostos na Tabela 22.

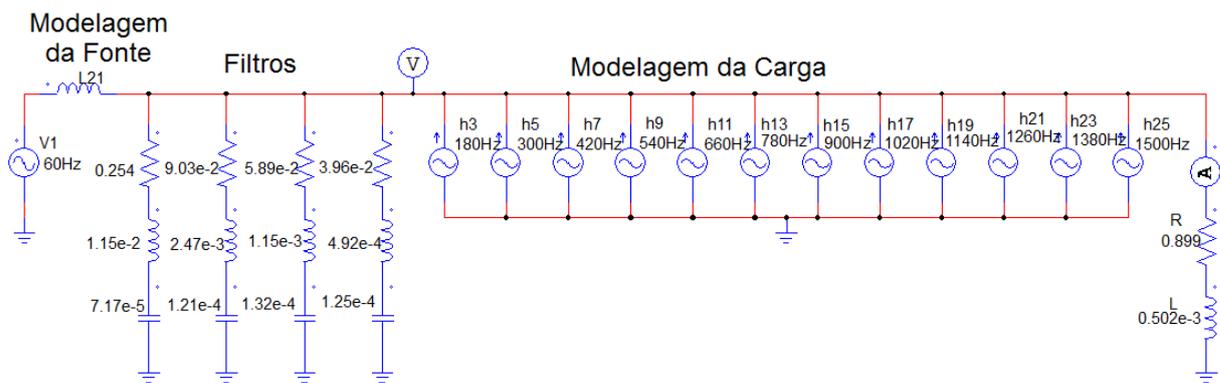
Tabela 22 – Valores do filtro de 11ª ordem

Grandezas	Valores calculados
Q_f	6,451 Kvar
$X_{C,1}$	20,983 Ω
$X_{L,1}$	1,857 Ω
L_h	0,0004920 H
C_h	0,0001253 F
R_h	0,0396 Ω

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 42 apresenta o filtro instalado ao sistema modelado.

Figura 42 – Modelagem do sistema com filtro de 11ª Ordem



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Com a adição do filtro de 11ª ordem harmônica, conforme mostra a Figura 42, foram extraídos os valores expostos na Tabela 23.

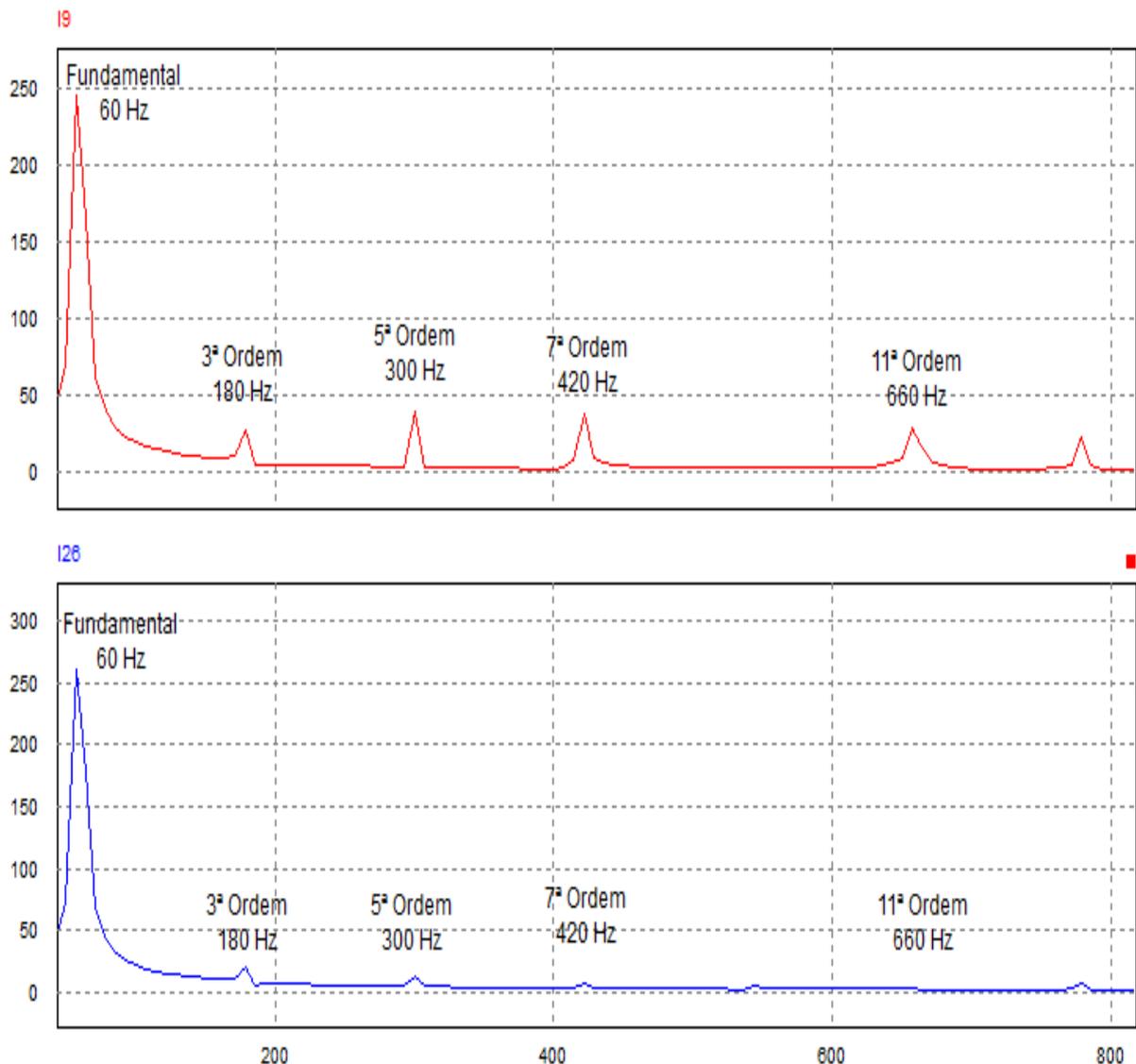
Tabela 23 – Valores simulados para filtro de 11ª ordem

Grandeza	Extraído do relatório	Simulado no PSIM	Simulado com Filtro 11ª Ordem
$THD_{i,L1}$	22,9 %	22,26 %	5,19 %
$FP_{L,1}$	0,91	0,91	0,97
$P_{L,1}$	50 kW	50,13 kW	54,54 kW
$S_{L,1}$	55 kVA	54,81 kVA	55,83 kVA
$I_{L,1}$	230 A	235,80 A	246,07 A
$V_{f,1}$	235 V	231,50 V	226,89 V

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Conforme pode ser verificado na Tabela 23, após a adição do filtro de 11ª ordem harmônica, o valor de distorção harmônica total de corrente está inferior ao valor máximo de distorção estabelecido pela IEEE-519 (2014), que é de 8%. A Figura 43 traz o comparativo dos espectros de harmônicos antes e após a adição dos filtros.

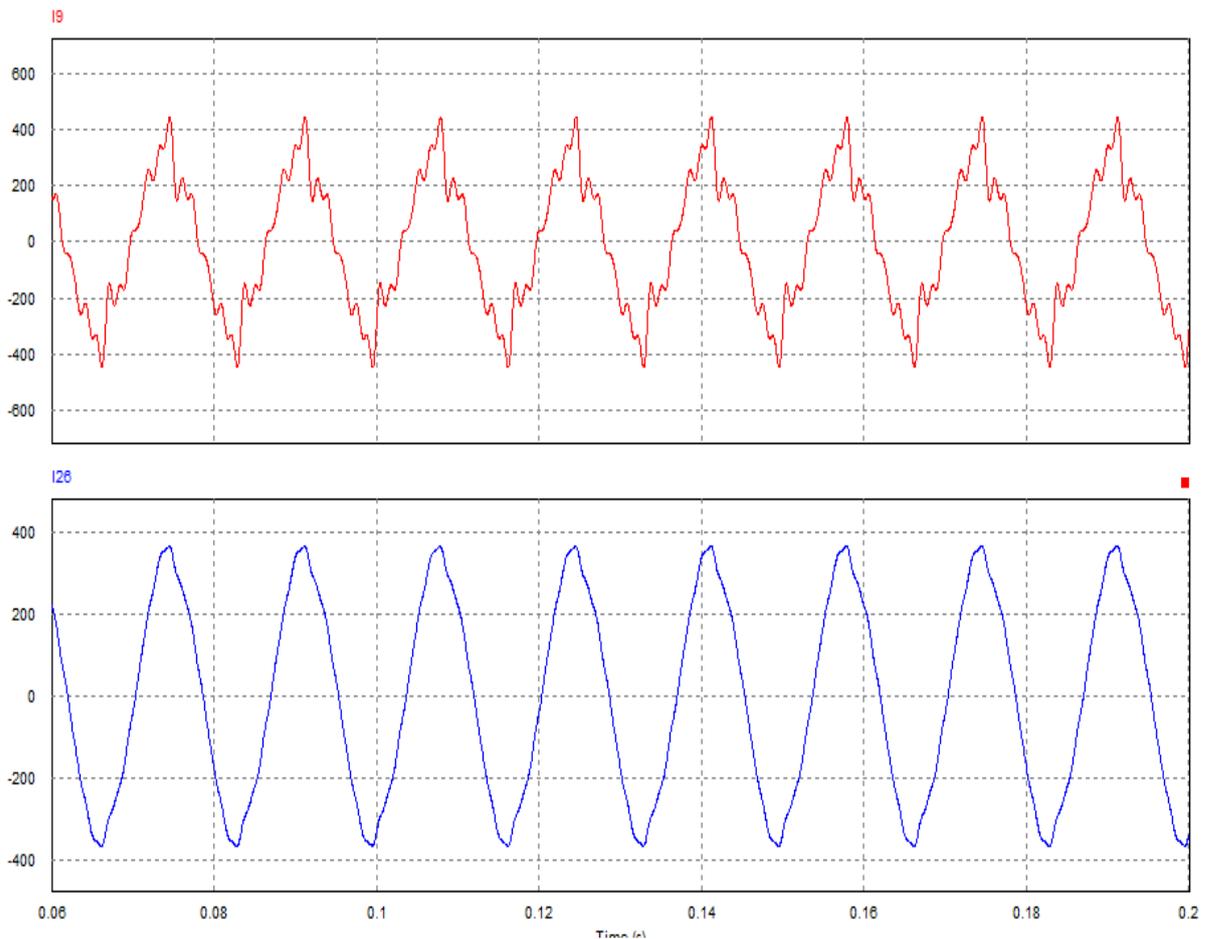
Figura 43 – Espectro com filtro de 11ª harmônica



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 43 mostra a acuracidade do filtro harmônico de 11ª ordem que, juntamente com os filtros instalados de 3ª, 5ª e 7ª, drenam as correntes harmônicas deixando a distorção harmônica total de corrente dentro do patamar esperado, amparado pelo IEEE-519 (2014). A Figura 44 compara as formas de onda do sistema modelado antes e após a adição do banco de filtros.

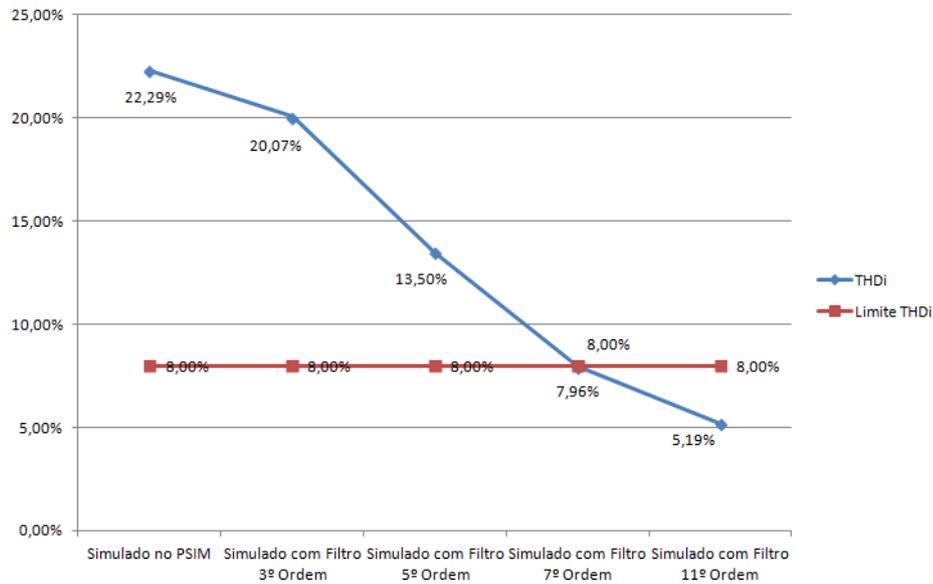
Figura 44 – Comparação entre as formas de onda na fundamental



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 44 mostra, em vermelho, a forma de onda do sistema modelado original, sem a adição dos filtros, e, em azul, a forma de onda do sistema modelado após a adição dos quatro filtros passivos de sintonia simples em paralelo com a carga.

Essa condição do sistema retira a necessidade de adição de novos filtros passivos de sintonia para as harmônicas de ordens superiores. A Figura 45 indica a evolução da THD_i .

Figura 45 – Evolução da redução da THD_i

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

A Figura 45 mostra a evolução da redução da distorção harmônica total de corrente durante a adição dos filtros no sistema. Como pode ser verificado, a barreira do estabelecido na IEEE-519 (2014) foi atingida na inclusão, no sistema, do filtro da 7ª ordem. Porém, pelo fato de a barreira ficar no limiar do limite, ainda foi adicionado o filtro para a 11ª ordem.

Como os valores da distorção harmônica total de corrente ficaram dentro dos limites estabelecidos pela IEEE-519 (2014), pode-se concluir que o projeto e a instalação dos filtros de harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 11ª no sistema simulado é eficiente e eficaz, não havendo a necessidade de projetar mais filtros para o sistema modelado.

Tendo em vista que a adição do banco de filtros harmônicos aumentou para 0,97, no sistema modelado, o Fator de Potência da subestação, haverá uma melhora na eficiência energética da planta, na perda por calor dos condutores e atendimento ao valor especificado no Módulo 8 do PRODIST (2015) que é superior a 0,92.

Para as fases 2 e 3 do sistema, que também apresentaram distorção harmônica total de corrente acima do estabelecido pela IEEE-519 (2014), será utilizada a mesma modelagem do sistema e banco de filtro calculados para a fase 1, pois a carga é equilibrada, permitindo, assim esta prática.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho tratou do estudo de qualidade de energia em uma subestação, procurando analisar as medições intrínsecas à distorção harmônica. Nas alterações de grandes cargas nas subestações já existentes, não é premissa o estudo de qualidade de energia para validá-las, o que pode vir a ocultar problemas com potencial para gerar grandes efeitos às cargas instaladas.

O objetivo principal desse trabalho foi realizar um estudo de qualidade de energia em uma subestação interna de uma empresa alimentícia. Contratou-se, para isso, uma empresa para que realizasse a coleta dos dados e, após, gerasse um relatório com os valores encontrados.

A partir do relatório gerado, realizou-se a verificação das medições coletadas. Para as grandezas elétricas de corrente de fase, tensão de fase, potência aparente, potência reativa e potência ativa, apresentaram-se valores coerentes com a carga instalada. Para os valores do fator de potência, os dados coletados apresentaram picos de fator de potência abaixo do limite mínimo estabelecido pelo PRODIST Módulo 8.

Para contemplar o objetivo deste projeto, foi utilizado, como metodologia, a elaboração de filtros passivos para correção de distorções harmônicas que apresentassem valores acima do especificado pelas normas vigentes. Durante análise dos dados referente às distorções harmônicas de tensão, sendo utilizado o Módulo 8 do PRODIST como referência para os limites de distorção harmônica total e individual de tensão, constatou-se que, para esse distúrbio, os valores encontrados estavam dentro dos limites especificados pela norma. Contudo, para os valores de distorção harmônica total e individual de corrente, os valores observados estavam acima dos limites especificados pela norma internacional IEEE-519/2014.

A utilização de filtros passivos para reduzir o efeito harmônico é uma das soluções mais simples e mais utilizadas comercialmente e tem grande eficiência e eficácia na redução de harmônicos de faixa específica. Essa característica pode ser observada durante as simulações, pois, em cada adição de filtro calculado para uma devida ordem harmônica, o espectro da referida ordem sofria uma atenuação, reduzindo-se, também, o resultado da distorção harmônica total de corrente.

A metodologia aplicada veio ao encontro da solução dos problemas relacionados com a distorção harmônica, trazendo, como técnica, a instalação de

filtros passivos ressonantes, sendo ela o principal atenuador do problema com distorção harmônica. Percebeu-se, de forma prática, que, além de corrigir a distorção harmônica, os filtros também corrigem o fator de potência. A modelagem do sistema com valores das grandezas elétricas, muito próximas aos coletados na subestação, e apresentadas no relatório, proporcionou uma visão real do problema, possibilitando, assim, o dimensionamento dos filtros passivos ressonantes simples de forma muito próxima ao real e com possibilidade de implementação.

Após a realização do projeto e a implementação do filtro para correção da distorção harmônica de 7^a ordem no circuito modelado, os valores de distorção harmônica total de corrente já se encontravam dentro dos limites especificados pela norma IEEE-519/2014, mais precisamente com valores de 7,96%. Contudo, optou-se por adicionar, ainda, o filtro para a harmônica de 11^a ordem, a fim de garantir um afastamento maior do limite trazido pela norma (8%), de forma que, com variações na carga, este limite não seja tão facilmente transgredido.

Como sugestão para continuidade deste trabalho, sugere-se os seguintes trabalhos futuros voltados a qualidade de energia elétrica:

- implementar os filtros projetados na subestação em estudo;
- replicar o estudo realizado para as demais subestações da planta;
- avaliar ressonância na planta, referente a resposta em frequência;
- avaliar os impactos das harmônicas de corrente nas harmônicas de tensão na planta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A-EBERLE, **Introdução**. Disponível em: <<https://www.a-eberle.de/en/product-groups/pq-mobile/devices/pq-box-100>>. Acesso em: 1 nov. 2018.
- ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**. Rev 6. 2015.
- BALTAZAR, A. C. S. **Qualidade da Energia no Contexto da Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro**. 2007. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CARVALHO, A. C. DE C. **Diagnóstico do consumo e da qualidade de energia numa indústria metalúrgica**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.
- DANFOSS, **VLT Introdução 2800**. Disponível em: <http://www.danfoss.com.br/home/#/>. Acesso em: 12 out. 2018.
- DIAS, GUILHERME A.D., **Harmônicos em Sistemas Industriais**. 1ª Edição. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.
- DUGAN, ROGER. C. et al. **Electrical Power systems quality**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- FARIA, G. H.; SOARES, D.M.; LINO, T.; DIAS, T.J.; MUSICO, L.G.; BATISTA, L.; PEREIRA, G. **Suportabilidade de eletrodomésticos frente a distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica**. 2014. Artigo Universitário – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- FIGUEIREDO, ALFREDO A. C., **Análise de Modelos para Cargas Não Lineares no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica**. 2006. Dissertação de Mestrado – Faculdade de engenharia de Ilha Solteira, Estado de São Paulo.
- GAMA, ARQUIMEDES C. **Análise da distorção harmônica em uma instalação industrial**. 2017. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Vale do São Francisco.
- IEEE-1159, **The Institute of Electrical and Electronics Engineers**. 2009. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5154067>. Acesso em: 26 out. 2018.
- IEEE-1250, **The Institute of Electrical and Electronics Engineers**. 2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5744556>. Acesso em: 15 out. 2018.
- IEEE-1459, **The Institute of Electrical and Electronics Engineers**. 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5439063>; Acesso em: 15 out. 2018.

IEEE-519. **The Institute of Electrical and Electronics Engineers**. 2014

ISONI, M. **A moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas – Distorções Harmônicas – Uma revisão de Conceitos Gerais**. 2014. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiPmMG_s47TAhUDS5AKHVzgcMmEQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fdocumento.ifnmg.edu.br%2Faction.php%3Fkt_path_info%3Dktcore.action.s.document.view%26fDocumentId%3D2908&usg=AFQjCNFqUKHtXjERT0EGa5oJS pWqal4noA> Acesso em: 8 set. 2018

LEÃO, RUTH; SAMPAIO, RAIMUNDO FURTADO; ANTUNES, FERNANDO LUIZ MARCELO. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

MAIA, REINALDO M. **Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia**. 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais.

MARTINHO, EDSON. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2013

MORENO, HILTO. **Harmônicas nas instalações elétricas**. 1. Ed. São Paulo, SP: Procobre, 2001.

NARDI, Cleidimar. **Dimensionamento de filtros passivos para conversores estáticos de energia**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná.

NDIAYE, MAMOUR S. **Modelagem de cargas não lineares por fontes de correntes sincronizadas**. 2006. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NOGUEIRA, VINÍCIUS DE FREITAS GOMES. **Geração distribuída usando geradores síncronos trifásicos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

OLIVEIRA, WAGNER JOSÉ NASCIMENTO DE. **Projeto de filtro passivo para a redução de correntes harmônicas na subestação de 2x300 kVA da estação elevatória de água do Jiqui**. 2015. Projeto Técnico (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Mestrado profissional em Engenharia elétrica.

PAULILO, G. **Conceitos Gerais Sobre Qualidade da Energia. Cap. 1: Qualidade de Energia**. O Setor Elétrico, 2013.

POWERSIM. **Definição**. Disponível em: <http://www.powersim.com/>. Acesso em: 1 nov. 2019.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5.ed. São Paulo, SP: McGraw – Hill, 2008.

SILVA, I. M. **Normas e Regulamentações em Qualidade da Energia Elétrica Sob a Ótica do Fornecedor**. Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

SILVA, L. C. E. **Efeitos das Distorções Harmônicas (tensões e correntes) e Desequilíbrios (tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2008.

TEIXEIRA, DOUGLAS ÂNGELO. **Análise das Distorções Harmônicas Estudo de Caso de um Sistema industrial**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.

WEBER, DAN L. **Impacto da conexão de cargas não lineares em sistemas de distribuição de energia**. 2015. Trabalho de conclusão de curso - Universidade do vale do rio dos Sinos – Unisinos.