

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA ELÉTRICA

WAGNER JOSÉ NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA A REDUÇÃO DE
CORRENTES HARMÔNICAS NA SUBESTAÇÃO DE 2X300
kVA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA DO JIQUI**

Natal

2015

WAGNER JOSÉ NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA A REDUÇÃO DE
CORRENTES HARMÔNICAS NA SUBESTAÇÃO DE 2X300
kVA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA DO JIQUI**

Projeto técnico de mestrado apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Energia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Qualidade de Energia.

ORIENTADORA: Prof. D. Sc. Crisluci Karina
Souza Santos Cândido

Natal
2015

WAGNER JOSÉ NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA A REDUÇÃO DE
CORRENTES HARMÔNICAS NA SUBESTAÇÃO DE 2X300
kVA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA DO JIQUI**

Este projeto técnico de mestrado foi julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Orientadora e pela Banca Examinadora.

Orientadora: _____

Prof. D. Sc. Crisluci Karina Souza Santos Cândido, UFRN

Doutora pela UFRN – Natal, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Crisluci Karina Souza Santos Cândido, UFRN (Membro interno)

Doutora pela UFRN – Natal, Brasil

Prof. D. Sc. Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira, UFRN (Membro interno)

Doutor pela UFRN – Natal, Brasil

Prof. D. Sc. José Tavares de Oliveira, UFRN (Membro interno)

Doutor pela UFRJ – Rio de Janeiro, Brasil

Prof. D. Sc. Max Chianca Pimentel Filho, UFERSA (Membro externo)

Doutor pela UFRN – Natal, Brasil

Coordenador do MPEE: _____

Prof. Dr. ING. Manoel Firmino de Medeiros Júnior

Natal, Maio - 2015.

DEDICATÓRIA

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edson Modesto de Oliveira e Regina Lúcia Nascimento de Oliveira pelo amor, compreensão e paciência.

À minha esposa Lianne pela força, carinho e apoio.

A Bia e Lobinho, por alegrarem os meus dias.

Aos meus irmãos pelos exemplos dados.

Ao Programa do Mestrado Profissional em Energia Elétrica, MPPEE, pela oportunidade.

Aos colegas de trabalho, Ciro, Jarian, João Pablo e José Antônio pela ajuda.

A Sérgio Motta pela colaboração.

Ao amigo Thales.

À professora Crisluci, ao professor Arrhenius e ao professor José Tavares.

A todos que de forma direta ou indireta ajudaram no trabalho.

RESUMO

Trata-se de um caso prático visto na indústria de saneamento em que se observaram parâmetros de qualidade de energia elétrica utilizando medidores de grandezas elétricas durante as manutenções preditivas realizadas na Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Foram constatadas correntes harmônicas em desconformidade com as normas, causadas pelo acionamento dos motores por meio de inversores de frequência. Para a solução do caso, este trabalho de conclusão de Mestrado apresenta o projeto de filtros harmônicos passivos em sintonia única a serem instalados em paralelo nos terminais de baixa tensão de cada um dos transformadores de 300 kVA da subestação que fornece energia elétrica para a Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB) do Jiqui, da CAERN, principal captação de água de Natal-RN. Os equipamentos promovem a redução das distorções harmônicas de corrente para os níveis tolerados nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*) 61000-3-4 e IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 519. O sistema é modelado desde a subestação da concessionária até as cargas energizadas pela subestação da CAERN e simula a operação dos filtros de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens de forma isolada e também interligada, obtendo as respostas para as implementações feitas para os diferentes fatores de qualidade. São avaliadas as novas harmônicas de corrente e tensão para cada frequência, bem como o comportamento do sistema na frequência. Observam-se as ressonâncias em série dos filtros sintonizados e também as ressonâncias paralelas, sendo utilizada para tal a ferramenta computacional HARMZS, versão 1.8, desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPTEL. Para as simulações das correntes e tensões é usado o programa SCILAB, versão 5.5.1.

Palavras-chave: Qualidade de Energia. Filtros Passivos. Harmônicas. Indústria do Saneamento.

ABSTRACT

This work is based in a sanitation industry real case where electrical power quality parameters were diagnosed using electrical quantities meters during the predictive maintenance done in Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Divergent harmonic currents were observed against the standard recommendations, caused by the use of inverters for driving the motors. To solve this case, this final work presents passive harmonic filters single tuned to be installed in parallel with the low voltage cables of each 300 kVA transformers that supplies power to raw water pumping station of Jiqui - CAERN, the main water supplier of Natal-RN. The equipments promote the reduction of harmonic current distortion to be within the tolerated levels to comply with the IEC (International Electrotechnical Commission) 61000-3-4 and IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 519 standards. This study models the entire system, from the concessionary power substation until the final loads located in CAERN, and proposes the computer simulations of installing 5th, 7th, 11st and 13rd order filters isolated and integrated, obtaining the answers to all different applications performed with different quality factors. New harmonic current and voltage for each frequency, as well as the system behavior in the frequency are evaluated. Series and parallel resonances in tuned filters are observed with the computational tool developed by Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Electric Power Research Center) – CEPTEL, HARMZS, version 1.8. For currents and voltages simulations is used the computational tool SCILAB, version 5.5.1.

Keywords: Power Quality. Passive Filters. Harmonics. Sanitation Industry.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
SUMÁRIO.....	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	10
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS.....	16
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. REVISÃO DE LITERATURA	23
3. NORMAS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS	26
4. MEDIÇÕES REALIZADAS.....	31
5. PROPOSTA DE TRABALHO.....	34
6. TEORIA GERAL DOS FILTROS HARMÔNICOS.....	37
6.1. INTRODUÇÃO AOS FILTROS	37
6.2. FILTROS PASSIVOS	39
6.2.1. FILTROS DE SINTONIA.....	40
6.2.1.1. SIMPLES.....	40
6.2.1.2. DUPLA SINTONIA.....	41
6.2.1.3. AMORTECIDO.....	42
6.3. FILTROS ATIVOS	45

6.4.	FILTROS HÍBRIDOS.....	45
7.	INTRODUÇÃO AOS HARMÔNICOS.....	47
8.	MEMORIAL DE CÁLCULO - PROJETO DOS FILTROS HARMÔNICOS	49
8.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	49
8.2.	DIMENSIONAMENTO DOS CAPACITORES	52
8.3.	MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 5ª HARMÔNICA.....	54
8.4.	MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 7ª HARMÔNICA.....	61
8.5.	MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 11ª HARMÔNICA.....	64
8.6.	MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 13ª HARMÔNICA.....	67
9.	SIMULAÇÕES.....	75
10.	DESEMPENHO DOS FILTROS HARMÔNICOS NA FREQUÊNCIA	99
10.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	99
10.2.	DESEMPENHO DAS IMPEDÂNCIAS DOS FILTROS CONSIDERANDO UM FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 20.....	105
10.3.	DESEMPENHO DAS IMPEDÂNCIAS DOS FILTROS CONSIDERANDO UM FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 50.....	109
10.4.	DESEMPENHO DAS IMPEDÂNCIAS DOS FILTROS CONSIDERANDO UM FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 80.....	112
11.	MEMORIAL DESCRITIVO	116
11.1.	GENERALIDADES	116
11.2.	LOCALIZAÇÃO.....	116
11.3.	ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS E COMPONENTES UTILIZADOS NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS.....	117
11.4.	INSTALAÇÃO	125
11.5.	INTERLIGAÇÃO DE ENERGIA.....	125

11.6.	ATERRAMENTO	126
11.7.	LEGISLAÇÃO BÁSICA.....	128
12.	CONCLUSÕES	129
12.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	130
	REFERÊNCIAS.....	132
	APÊNDICE A: CÓDIGO UTILIZADO NO PROGRAMA HARMZS.....	137
	ANEXO A: DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO DO JIQUI DA	
	CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA LOCAL	140
	ANEXO B: DADOS DA REDE ELÉTRICA FORNECIDOS PELA	
	CONCESSIONÁRIA LOCAL	141

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama Unifilar da Estação Elevatória do Jiqui – Baixo Recalque	19
Figura 2 – Filtro <i>shunt</i> de sintonia única para a 5 ^a , 7 ^a , 11 ^a e 13 ^a harmônica	36
Figura 3 – Resposta ideal do filtro (a) rejeita faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-alta; (d) passa-baixa.....	37
Figura 4 – Elementos (a) resistivos, (b) indutivos e (c) capacitivos.....	39
Figura 5 – Filtro passivo de sintonia simples	41
Figura 6 – Filtros passivos de dupla sintonia	42
Figura 7 – Filtros amortecidos de 1 ^a ordem	43
Figura 8 – Filtro amortecido de 2 ^a ordem	43
Figura 9 – Filtro amortecido de 3 ^a ordem	44
Figura 10 – Filtro amortecido do tipo C	44
Figura 11 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados	76
Figura 12 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de dessintonia de 3%.....	78
Figura 13 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados, um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade igual a 20...	79

Figura 14 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados, um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade igual a 50...	81
Figura 15 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados, um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade igual a 80...	83
Figura 16 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados	85
Figura 17 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para um fator de qualidade igual a 20.....	87
Figura 18 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para um fator de qualidade igual a 50.....	88
Figura 19 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para um fator de qualidade igual a 80.....	89
Figura 20 – Corrente do sistema sem a instalação dos filtros	92
Figura 21 – Corrente do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 20	93
Figura 22 – Corrente do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 50	93
Figura 23 – Corrente do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 80	94

Figura 24 – Tensão do sistema sem a instalação dos filtros	96
Figura 25 – Tensão do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 20	97
Figura 26 – Tensão do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 50	97
Figura 27 – Tensão do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 80	98
Figura 28 – Circuito RLC série e característica da impedância	100
Figura 29 – Resposta em frequência da impedância do sistema sem a instalação dos filtros	101
Figura 30 – Resposta em frequência da impedância do sistema com a instalação dos filtros, considerando a resistência R e o fator de qualidade igual a 20.....	102
Figura 31 – Resposta em frequência da impedância do sistema com a instalação dos filtros, considerando a resistência R e o fator de qualidade igual a 50.....	103
Figura 32 – Resposta em frequência da impedância do sistema com a instalação dos filtros, considerando a resistência R e o fator de qualidade igual a 80.....	104
Figura 33 – Resposta em frequência da impedância dos filtros com o transformador desligado para o fator de qualidade igual a 20.....	105
Figura 34 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 5ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20.....	106
Figura 35 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 7ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20.....	107
Figura 36 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 11ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20.....	108
Figura 37 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 13ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20.....	108
Figura 38 – Resposta em frequência da impedância dos filtros com o transformador desligado para o fator de qualidade igual a 50.....	109

Figura 39 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 5 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 50	110
Figura 40 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 7 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 50	110
Figura 41 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 11 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 50	111
Figura 42 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 13 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 50	112
Figura 43 – Resposta em frequência da impedância dos filtros com o transformador desligado para o fator de qualidade igual a 80	113
Figura 44 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 5 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 80	113
Figura 45 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 7 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 80	114
Figura 46 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 11 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 80	114
Figura 47 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 13 ^a harmônica para o fator de qualidade igual a 80	115
Figura 48 - Mapa de localização da Estação Elevatória de Água do Jiqui	117
Figura 49 - Vista da interligação ao sistema de aterramento	127
Figura 50 – Conector tipo “U” (cabo-haste)	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites das harmônicas de corrente admissíveis pela Norma IEC 61000-3-4.....	27
Tabela 2 – Limites das harmônicas de corrente admissíveis pela Norma 519 – IEEE.....	28
Tabela 3 – Limites das harmônicas de tensão admissíveis pela Norma 519 – IEEE	29
Tabela 4 – Limites das harmônicas de tensão admissíveis pela ANEEL	29
Tabela 5 – Limites das harmônicas de tensão por frequência admissíveis pela ANEEL.....	30
Tabela 6 – Valores das medições das harmônicas de corrente.....	32
Tabela 7 – Harmônicas de corrente que se encontram fora dos limites das normas	32
Tabela 8 – Valores das medições das harmônicas de tensão	33
Tabela 9 – Relação das principais cargas em operação na Estação do Jiqui	49
Tabela 10 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados.....	77
Tabela 11 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados.....	78
Tabela 12 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de qualidade igual a 20	80
Tabela 13 – Valores das medições das harmônicas de corrente para $Q=20$	80
Tabela 14 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de qualidade igual a 50	82

Tabela 15 – Valores das medições das harmônicas de corrente para $Q=50$	82
Tabela 16 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de qualidade igual a 80	84
Tabela 17 – Valores das medições das harmônicas de corrente para $Q=80$	84
Tabela 18 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados.....	86
Tabela 19 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para $Q=20$	87
Tabela 20 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para $Q=50$	88
Tabela 21 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para $Q=80$	90
Tabela 22 – Quadro comparativo das distorções harmônicas de corrente para o fator de qualidade igual a 20, 50 e 80 e a situação inicial sem filtro	91
Tabela 23 – Quadro comparativo das distorções harmônicas de tensão para o fator de qualidade igual a 20, 50 e 80 e a situação inicial sem filtro	95

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CAERN: Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte

CELPE: Companhia Energética de Pernambuco

CEPEL: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

COSERN: Companhia Energética do Rio Grande do Norte

EEAB: Estação Elevatória de Água Bruta

EEAT: Estação Elevatória de Água Tratada

ETA: Estação de Tratamento de Água

IEC: *International Electrotechnical Commission* ou Comissão Internacional de Eletrotécnica

IEEE: *Institute of Electrical and Electronic Engineers* ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ISO: *International Organization for Standardization* ou Organização Internacional para Padronização

ITU: *International Telecommunication Union* ou União Internacional de Telecomunicação

MPEE: Mestrado Profissional em Energia Elétrica

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

RLC: Resistivo, Indutivo e Capacitivo

RMS: *Root Mean Square* ou valor quadrático médio (eficaz)

TDD: *Total Demand Distortion* ou Distorção de Demanda Total

THD: *Total Harmonic Distortion* ou Distorção Harmônica Total

THDi: *Total Harmonic Distortion of Current* ou Distorção Harmônica Total de
Corrente

THDv: *Total Harmonic Distortion of Voltage* ou Distorção Harmônica Total de
Tensão

1. INTRODUÇÃO

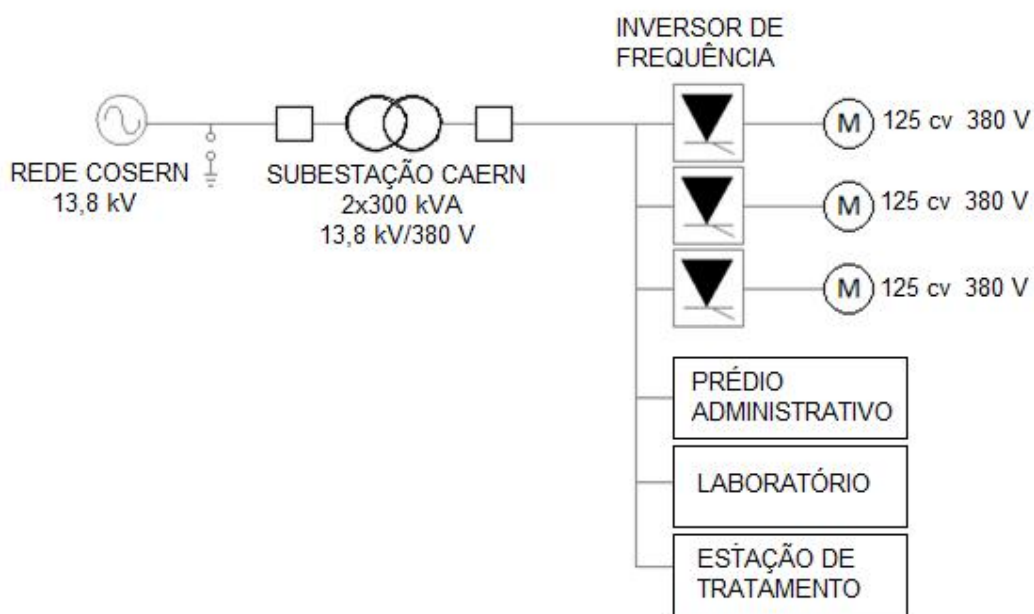
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) dispõe de uma Estação Elevatória de Água – Estação do Jiqui – cujo abastecimento abrange as zonas sul, leste e oeste de Natal, atingindo todos os bairros com exceção do Guarapes, Cidade Satélite, Planalto e Ponta Negra. É a maior fonte de suprimento de água da capital potiguar, com vazão de aproximadamente 2.400 m³/h, o que representa cerca de 35% da produção total das três zonas da cidade, sendo composta atualmente por duas adutoras.

A captação da água bruta se dá através da Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB) que fica situada na Lagoa do Jiqui, sendo a água bombeada para a Estação de Tratamento de Água (ETA), onde é feito o tratamento do fluido (pré-oxidação, coagulação, filtração e desinfecção). Posteriormente, a água flui por gravidade para os dois reservatórios apoiados de onde são feitos os bombeamentos por meio das duas estações elevatórias de água tratada para os reservatórios de distribuição da capital.

Conforme mostrado na Figura 1, existe uma subestação abrigada composta por 2 transformadores de 300 kVA, em 13.800/380 V para o suprimento de energia elétrica da Estação Elevatória do Baixo Recalque (Estação Elevatória de Água Bruta), prédio administrativo, laboratório de química e Estação de Tratamento de Água. As cargas mais significativas são os três motores de 125 cv, acionados por meio de inversores de frequência, que bombeiam água bruta do manancial de superfície para a ETA. Desses motores, apenas dois operam ao mesmo tempo, ao passo que o terceiro conjunto é denominado de reserva.

Figura 1 – Diagrama Unifilar da Estação Elevatória do Jiqui – Baixo Recalque



Por ser considerada a estação mais importante da CAERN, foi feito um levantamento das grandezas elétricas por meio de medições utilizando o analisador de energia do fabricante *Instrutherm*, modelo AE-200, e constatou-se que exatamente na subestação principal, responsável pelo suprimento de energia elétrica para os motores instalados na captação de água bruta, existe a presença de harmônicas de corrente em níveis superiores aos recomendados pelas normas.

As harmônicas são componentes senoidais da corrente ou tensão, cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental da rede. O resultado da sobreposição das diversas ondas harmônicas com a fundamental é uma onda periódica com distorções. Como consequência, existe uma depreciação da qualidade de energia elétrica com possibilidade da ocorrência de diversos danos.

Para corrigir as anormalidades encontradas, este estudo propõe a elaboração de projeto visando à implementação de filtros passivos de sintonia única a serem utilizados em paralelo com as cargas de acordo com cada frequência harmônica.

Para o início do trabalho, é necessária a realização da modelagem do sistema, contendo os dados fornecidos pela Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN), contemplando as informações da subestação que supre energia para a Estação do Jiqui até o ponto de entrega do consumidor, com os elementos da rede de distribuição de energia, além das informações dos dados dos transformadores da subestação da CAERN e das cargas que estão em operação. Após a organização das informações, torna-se possível a realização das simulações necessárias.

Nas simulações devem ser observadas as correções das correntes harmônicas, as possíveis variações das distorções harmônicas de tensão, as impedâncias características e os possíveis distúrbios que possam surgir. É preciso comparar os resultados obtidos com os valores recomendados nas Normas IEC 61000-3-4 - *International Electrotechnical Commission* e IEEE 519 - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*.

Os programas utilizados nas simulações são o SCILAB e o HARMZS, em sua versão estudantil, usando a plataforma EDIT CEPEL para edição do código e o PLOT CEPEL para plotagem dos gráficos. O HARMZS é uma ferramenta computacional desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL que permite o estudo de redes elétricas e a coleta de todos os dados da análise harmônica convencional. Sua utilização permite a constatação das distorções harmônicas de tensão e corrente para cada frequência e o comportamento da impedância do sistema no domínio da frequência.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 12 capítulos. Passa-se a discorrer sobre cada um deles.

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao sistema estudado, com suas caracterizações e importância. Traz o problema que foi encontrado e o modo de operação da estação elevatória.

O capítulo 2 aborda alguns estudos relacionados a este trabalho, trazendo algumas soluções encontradas e traçando um paralelo com as opções tomadas.

O capítulo 3 traz as informações contidas nas normas relacionadas que tratam da questão da qualidade de energia elétrica que formam a base das ações propostas para correção neste projeto de mestrado.

O capítulo 4 detalha as medições feitas nos equipamentos da subestação elétrica com os dados relativos à qualidade da energia elétrica. São relatadas as medições das harmônicas de corrente e das harmônicas de tensão.

O capítulo 5 mostra a escolha dos filtros feita para o trabalho final do mestrado profissional, levando em consideração os diversos problemas que podem ocorrer nos sistemas elétricos.

O capítulo 6 descreve os conceitos gerais sobre os filtros, bem como as tecnologias dos diversos tipos, mostrando as características de cada modelo diferente.

O capítulo 7 introduz os conhecimentos sobre as harmônicas nos sistemas.

O capítulo 8 apresenta o memorial de cálculo para os projetos dos filtros harmônicos nas diversas frequências usados para a correção do problema prático encontrado na indústria de saneamento.

O capítulo 9 mostra o resultado das simulações da introdução dos filtros no sistema elétrico, informando as conclusões das interligações propostas, usando como base os dados coletados do sistema *in loco* e os dimensionamentos dos elementos passivos dos filtros projetados.

O capítulo 10 traz os resultados dos desempenhos dos filtros na frequência, abordando as ressonâncias em série e paralela.

O capítulo 11 refere-se ao memorial descritivo contendo todas as especificações dos materiais, instalações e detalhes necessários para a execução do projeto.

O capítulo 12 informa as principais conclusões obtidas na execução do trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O estudo de harmônicas nos sistemas elétricos tem sido cada vez mais frequente. Dentre as formas mais comuns adotadas para a eliminação ou diminuição das correntes harmônicas está a aplicação de filtros ativos, passivos e híbridos.

Para Key, T., Lay, J-S. (1998 apud TEIXEIRA, 2009, p. 15), “Os filtros passivos são formados a partir de várias combinações dos elementos tipo resistivo, indutivo e capacitivo, podendo ser conectados em paralelo ou em série ao sistema elétrico.”

Para Arrillaga, J. et al. (1985 apud TEIXEIRA, 2009, p. 15):

Aqueles conectados em paralelo (derivação, ou *shunt*), têm sido amplamente estudados e aplicados em sistemas elétricos. Ao longo de vários anos, devido a fatores tecnológicos e econômicos, tal medida tem se firmado como a solução mais tradicional para a redução de harmônicos. Estes dispositivos podem ser classificados em dois grupos: sintonizados e amortecidos. Os filtros em derivação sintonizados são baseados no fenômeno da ressonância, que deve ocorrer para uma ou mais frequências harmônicas a serem eliminadas, apresentando, nesta situação, uma baixa impedância resistiva para elas. Os filtros em derivação amortecidos são constituídos por circuitos que oferecem uma baixa impedância ao longo de uma larga faixa de frequência. Na prática, são encontradas configurações que combinam o uso de filtros sintonizados para ordens harmônicas individuais (até a 13ª, por exemplo) e amortecidos para as frequências superiores.

Segundo Teixeira (2009), existe uma função adicional aos filtros sintonizados e amortecidos ao serem utilizados em frequências inferiores à de ressonância, pois se apresentam como circuitos capacitivos, sendo, portanto, compensadores de potência reativa na frequência fundamental.

Conforme Nascimento (2007, p. 2):

Para a mitigação dos problemas relacionados às harmônicas, uma das práticas mais usuais é a aplicação de filtros harmônicos passivos em derivação, sendo estes sintonizados ou amortecidos. Este tipo de solução não é nova e tem sido utilizada, há tempos, em grandes instalações industriais, sistemas de transmissão de energia ou, ainda, em subestações conversoras para transmissão em corrente contínua.

Para Alves (2013) é destacada a evolução dos filtros ativos desde os anos 80, mas sem deixar de considerar que sua aplicação representa alto custo, principalmente pela utilização do inversor com suas técnicas de acionamento.

O mesmo autor enuncia as principais razões para a utilização dos filtros passivos em derivação ao invés dos filtros em série:

- Produção de correntes harmônicas por parte das cargas não lineares seria inibida no seu ponto de origem;
- Dificuldades relacionadas com o isolamento elétrico dos componentes indutivos e capacitivos;
- Altas distorções de tensão nos terminais de saída do filtro;
- Condução de toda a corrente de carga, apresentando, por conseguinte, maior custo dos componentes e da instalação.

Unindo-se as características de alto custo dos filtros série com a possibilidade de projeto para frequências abaixo da frequência de ressonância havendo a compensação de energia reativa, optou-se pela escolha dos filtros em derivação.

Segundo Porras et al. (2003) orienta-se como primeiro passo sanar a injeção harmônica na baixa tensão e depois buscar reduzir as perdas, mantendo os níveis das harmônicas dentro dos valores recomendados com projetos de bancos de capacitores e filtros ativos ou passivos.

Bortoluzzi (2012) aborda a utilização dos filtros passivos sintonizados na ordem das harmônicas de maior impacto para a solução de caso prático de distorções harmônicas causadas por cargas não lineares, dando ênfase aos conversores de frequência. Para tal, construiu-se um pequeno sistema elétrico industrial em laboratório.

Este trabalho propõe a instalação dos filtros sintonizados para as frequências mais baixas no secundário dos transformadores da subestação da estação do baixo recalque pela

Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte, cujos dados são baseados em medições reais, atendendo às necessidades práticas da empresa.

O projeto visa à seleção de filtros que permitam a manutenção das taxas de distorção harmônica de tensão e as correntes harmônicas dentro dos padrões estabelecidos nas normas. Ao mesmo tempo, é imprescindível a análise do comportamento das impedâncias na frequência. Assim, os filtros em sintonia não devem provocar fortes ressonâncias paralelas e precisam possuir alta eficiência na ressonância em série.

3. NORMAS E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

Utilizando por base os padrões da IEC, IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers* ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), vinculado à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foram feitas medições das harmônicas para aferição da qualidade da energia elétrica nas saídas dos transformadores de 300 kVA.

Como primeira referência selecionou-se a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*), que é uma organização internacional de padronização de tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas. Alguns dos seus padrões são desenvolvidos juntamente com a *Internacional Organization for Standardization* (ISO), assim como o ITU (*International Telecommunication Union*). Suas normas contemplam assuntos relacionados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (IEC, 2014).

Os limites das harmônicas admissíveis pela Norma IEC 61000-3-4, mostrados na Tabela 1, são:

Tabela 1 - Limites das harmônicas de corrente admissíveis pela Norma IEC 61000-3-4

IEC 61000-3-4	
Número da Harmônica (n)	Corrente harmônica admissível (In/I1)% ¹
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	≤0,6
23	0,9
25	0,8
27	≤0,6
29	0,7
31	0,7
≥33	≤0,6

¹ I1 é a componente fundamental e In a componente harmônica.

O IEEE, criado em 1884, nos Estados Unidos, é uma organização técnico-profissional internacional, sem fins lucrativos, dedicada ao avanço da teoria e da prática da engenharia nos campos da eletricidade, eletrônica e computação. (IEEE, 2015).

Para consumidores, a Norma 519 – IEEE estabelece limites de correntes harmônicas em função do nível de curto-circuito local em relação ao tamanho da carga. A Tabela 2 mostra os limites para harmônicas ímpares em sistema de distribuição de 120 V até 69 kV.

Tabela 2 – Limites das harmônicas de corrente admissíveis pela Norma 519 – IEEE

I_{cc}^3/I_L^4	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TDD ²
<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, 1992

²TDD – Distorção de demanda total

³ I_{cc} – Corrente de curto circuito no Ponto de Entrega da CAERN = 3005 A

⁴ I_L – Corrente de carga = 12,55 A por transformador na Alta Tensão

$I_{cc}/I_L=119$, considerando a operação em paralelo dos transformadores de 300 kVA

n – Ordem harmônica

A distorção de demanda total (TDD) pode ser calculada com a divisão entre o valor *rms* da tensão, retirando a componente fundamental, sobre o valor da tensão fundamental.

Na mencionada norma, os valores das correntes harmônicas pares são limitados aos valores de 25% da Tabela 2. Entretanto, no caso prático deste estudo não foi encontrado nenhum valor par fora dos padrões, conforme resultados das medições mostradas no Capítulo 4.

Na Tabela 3 são demonstrados os limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental.

Tabela 3 – Limites das harmônicas de tensão admissíveis pela Norma 519 – IEEE

Tensão no ponto de acoplamento comum	Harmônicas individuais	TDHV
69kV e abaixo	3,0%	5,0%
69,001kV - 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1,0%	1,5%

Fonte: IEEE 519, 1992

TDHV – Distorção Harmônica Total de Tensão

Para este estudo, conforme Tabela 8 no Capítulo 4, não houve nenhum valor de harmônica de tensão fora da faixa recomendada pela Norma.

A ANEEL, nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – no Módulo nº 8 – Qualidade de Energia – estabelece os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão. Os limites das harmônicas de tensão admissíveis pela Agência estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites das harmônicas de tensão admissíveis pela ANEEL

Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

(em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

A Tabela 5, na sequência, expõe os valores das distorções harmônicas individuais.

Tabela 5 – Limites das harmônicas de tensão por frequência admissíveis pela ANEEL

Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão
(em porcentagem da tensão fundamental)

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

Da mesma maneira, conforme dados trazidos na Tabela 8, Capítulo 4, constata-se que todos os limites harmônicos para as distorções harmônicas de tensão estão atendidos.

Conforme a ANEEL, os aspectos considerados na qualidade da energia elétrica são:

- Tensão em regime permanente;
- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Variação de frequência.

4. MEDIÇÕES REALIZADAS

No decorrer das manutenções preventivas e preditivas realizadas na subestação de 2x300 kvar responsável pelo suprimento de energia elétrica para a Estação Elevatória de Água Bruta do Jiqui, foram coletados diversos dados das grandezas elétricas em operação. Dentre os dados levantados, foi dada uma atenção especial aos harmônicos, pois à primeira vista, as informações mereceram interpretações mais aprofundadas.

Os dados, demonstrados na Tabela 6, foram levantados pelo equipamento de análise da qualidade de energia de fabricação da Instrutherm, modelo AE-200, capaz de exibir, dentre outras funções: a forma de onda da tensão e corrente, demanda média e máxima em período escolhido, o diagrama de fase, distorções as harmônicas e fator de potência por fase.

As medições foram feitas nos cubículos de transformação da subestação de 2x300kVA da Estação Elevatória de Água Bruta do Jiqui, tendo sido usadas as garras de amperímetro sobre os cabos de baixa tensão e as ponteiros de tensão entre os terminais de fase e também interligado ao neutro do transformador. O levantamento foi feito em dupla, com auxílio de um técnico em eletrotécnica e com todos os equipamentos de segurança pertinentes.

Foram tomadas todas as precauções para que os dados coletados refletissem exatamente as situações reais de operação do sistema.

Tabela 6 – Valores das medições das harmônicas de corrente

HARMÔNICOS ANTES DA INSTALAÇÃO DOS FILTROS		
Ordem	Corrente (A)	Distorção harmônica de corrente
1	125	100,00%
3	1	0,80%
5	11	8,80%
7	25	20,00%
9	1,7	1,36%
11	11,9	9,52%
13	3,1	2,48%
15	0,1	0,08%
17	0,8	0,64%
19	0,2	0,16%
21	0,2	0,16%
23	0,1	0,08%
25	0,1	0,08%
THDi		24,03%

THDi: *Total Harmonic Distortion of Current*

As harmônicas pares não foram ilustradas, pois os maiores valores encontrados foram das harmônicas de ordem 2 e 8, representando valores de 0,1 A e 0,3% de distorção. Os demais valores foram iguais a 0 A.

As harmônicas de corrente ímpares de ordem baixa representam os maiores problemas para a instalação do Jiqui, de acordo com a comparação feita na Tabela 7, e serão esses os principais alvos para a correção proposta no trabalho. Na mesma Tabela, fazendo a correlação com as normas, tem-se que as harmônicas de corrente de ordens 7^a, 11^a e 13^a encontram-se com valores acima dos limites máximos tolerados.

Tabela 7 – Harmônicas de corrente que se encontram fora dos limites das normas

ORDEM HARMÔNICA	VALOR	IEC 61000-3-4	IEEE-519
7	20,00%	7,20%	12%
11	9,52%	3,1%	5,50%
13	2,48%	2%	-

Em relação às harmônicas de tensão, Tabela 8, constata-se que as grandezas estão de acordo com os padrões estabelecidos em todas as normas. Salienta-se que sua menção é importante para a verificação de surgimento de possíveis amplificações após a instalação dos filtros.

Tabela 8 – Valores das medições das harmônicas de tensão

HARMÔNICOS ANTES DA INSTALAÇÃO DOS FILTROS	
Ordem	Distorção harmônica de tensão
1	100%
2	0,40%
3	0,20%
4	0,00%
5	1,70%
6	0,00%
7	1,50%
8	0,00%
9	0,20%
10	0,00%
11	1,30%
12	0,00%
13	0,30%
14	0,00%
15	0,00%
16	0,00%
17	0,00%
18	0,00%
19	0,00%
20	0,00%
21	0,00%
22	0,00%
23	0,00%
24	0,00%
25	0,00%
THD_v TOTAL	2,50%

THD_v: *Total Harmonic Distortion of Voltage*

5. PROPOSTA DE TRABALHO

Diante dos dados das harmônicas ímpares de corrente encontrados nas medições feitas na Subestação da Estação do Jiqui, sabe-se que existem perdas relacionadas com a energia elétrica que podem provocar degradação de grande parte dos equipamentos instalados.

Fassbinder (2014) afirma que as correntes harmônicas são mais danosas para a rede de alimentação que as correntes reativas, vislumbrando ser possível imaginar que as concessionárias poderão cobrar no futuro por perdas harmônicas assim como hoje se cobra pela energia reativa.

As correntes reativas promovem desgastes nos equipamentos elétricos, redução da capacidade dos cabos alimentadores, acréscimo das perdas por aquecimento, redução da vida útil dos equipamentos e queda de tensão nos circuitos.

Já as harmônicas, conforme referenciado por Pomilio et al. (2014), reduzem a qualidade da energia elétrica, sendo a principal razão as deformações das ondas que trazem diversos efeitos negativos para os equipamentos, tais como:

- Vibrações e ruídos em transformadores e motores;
- Sobreaquecimento dos núcleos ferromagnéticos;
- Erros de medição de grandezas elétricas;
- Falha na atuação dos relés de proteção;
- Sobrecarga da rede elétrica, inclusive do condutor neutro pelo aumento das harmônicas de terceira ordem;
- Degradação dos bancos de capacitores;
- Falha de equipamentos de medição de vazão, pressão, de laboratório;
- Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias;

– Erro de controle de conversores.

Além dos benefícios diretos, a correção auxiliará na redução dos custos com energia reativa que chegam a contabilizar R\$14.000,00 (catorze mil reais) por mês para a CAERN quando ocorrem falhas nos bancos capacitivos. A aplicação do filtro tanto auxilia na manutenção dos equipamentos – promovendo maior longevidade – quanto aumenta o fator de potência. Auxilia também na redução das perdas ativas. No caso da ETA do Jiqui existe a operação de equipamentos sensíveis da área de química, além de equipamentos de medição de vazão e pressão que podem sofrer com a influência da baixa qualidade de energia elétrica. No ano de 2011, foi constatado caso concreto de falta na baixa tensão cujo relé de proteção também não atuou, o que possivelmente teve relação com a taxa de distorção harmônica. Nessa ocorrência, houve um curto-circuito nos terminais de baixa tensão, na caixa de ligação do motor da Estação Elevatória de Água do Jiqui, no qual tanto a proteção da chave eletrônica de partida como a proteção da subestação não atuaram. A atuação se deu nas chaves seccionadoras no ponto de entrega.

Com a execução do projeto, a empresa terá benefícios permanentes para a sua captação de água mais importante, o que resultará em uma melhor prestação de serviço essencial e de saúde pública para a população da cidade de Natal-RN, além de um relevante retorno financeiro para a empresa.

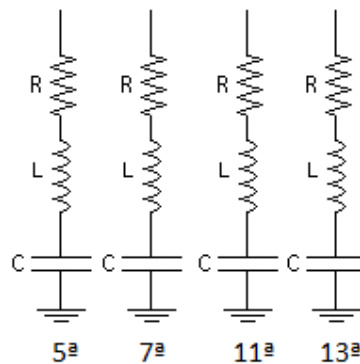
Dentre os mais diversos tipos de filtros ativos, passivos e híbridos, foi feita a opção pelo filtro passivo em derivação (*shunt*), pois o projeto se tornará menos custoso, sendo também uma solução mais robusta para o ambiente insalubre a ser instalado – onde a umidade e a temperatura são altas – e mais facilmente aplicável. Em contrapartida, esses filtros requerem cuidados, pois podem provocar ressonância em determinadas situações.

Fassbinder (2014) enfatiza a importância de sempre ser observada a sequência de desligamento dos filtros e também atenta para não permitir que as frequências mais altas circulem nos circuitos quando menos compensação é necessária.

Silva (2007) relata que os filtros ativos requerem a aplicação de chaves com uso de IGBTs, placas eletrônicas, processador digital de sinal, *drivers*, placas de condicionamento, transdutores e outros acessórios que dificultam a aplicação prática em um prazo reduzido, além de tornar o projeto mais custoso. Estima-se que os custos de um filtro sejam de 5% a 15% do valor do equipamento final.

Na aplicação da Estação do Jiqui, propôs-se a construção de filtros com resistores, indutores e capacitores *shunt* em sintonia única para as frequências mais baixas, conforme ilustrado na Figura 2. Com isso, os valores obtidos nas medições ficam adequados e reduzidos a níveis toleráveis. A opção pela correção adicional da corrente harmônica 5ª dá-se pelo interesse na otimização da taxa de distorção harmônica total de corrente (*Total Harmonic Distortion of Current - THDi*).

Figura 2 – Filtro *shunt* de sintonia única para a 5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônica

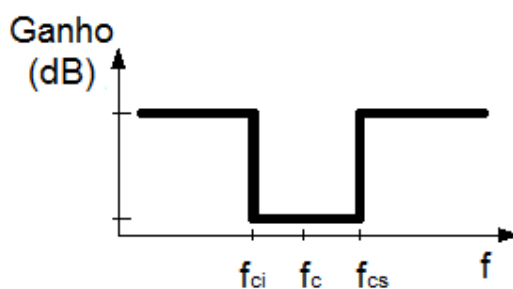


6. TEORIA GERAL DOS FILTROS HARMÔNICOS

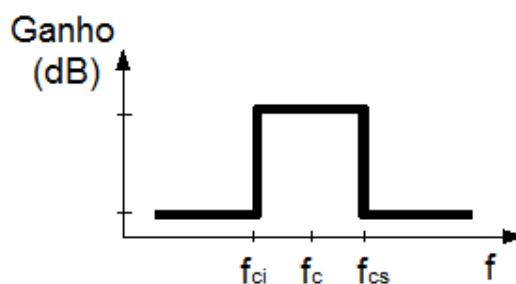
6.1. INTRODUÇÃO AOS FILTROS

Os filtros representam a maneira mais adequada para promover a redução dos módulos das correntes e tensões nas diversas frequências harmônicas. Sua aplicação promove uma maior aproximação da característica senoidal da tensão elétrica conforme as formas de onda encontradas na geração. Seu funcionamento dá-se de forma a restringir ou permitir a passagem de determinadas frequências. Quanto à resposta em frequência, os filtros são classificados em: rejeita-faixa, passa-faixa, passa-alta e passa-baixa, ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Resposta ideal do filtro (a) rejeita faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-alta; (d) passa-baixa.

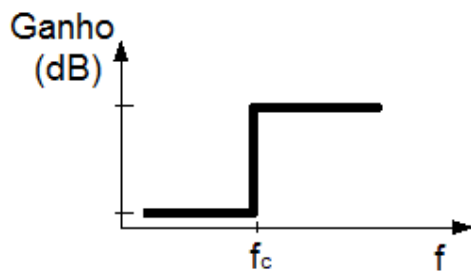


(a)

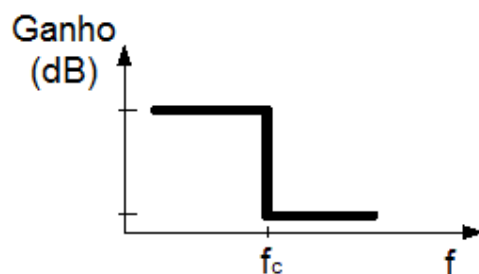


(b)

Figura 3 – Resposta ideal do filtro (a) rejeita faixa; (b) passa-faixa; (c) passa-alta; (d) passa-baixa.



(c)



(d)

Onde,

f_{ci} é a frequência de corte inferior;

f_{cs} é a frequência de corte superior;

f_c é a frequência de corte;

f é a frequência.

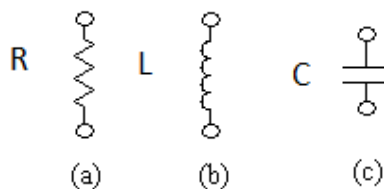
Para Leão, R. et al. (2014, p. 289-290):

O filtro passa-baixa permite passagem de sinais até uma frequência limite, denominada frequência de corte, acima da qual os sinais de frequências são atenuados. Os passa-baixa são utilizados em aplicações que requerem a rejeição de altas frequências. O oposto ao passa-baixa é o passa-alta, que rejeita sinais abaixo da frequência de corte. Os filtros passa-alta são usados em aplicações que requerem a rejeição de baixas frequências. Os filtros passa-faixa e rejeita-faixa apresentam duas

frequências de corte, inferior e superior. O primeiro é sintonizado para uma frequência e permite a passagem de uma faixa de frequências compreendida entre as de corte inferior e superior, enquanto o segundo, também denominado de filtro *notch*, permite a passagem de sinais apenas fora da faixa de frequências intermediárias. Filtros *notches* são usados para remover uma frequência não desejada de um sinal, afetando todas outras frequências o menor possível.

Os filtros são classificados em passivos, ativos e híbridos. Os filtros passivos são formados pela combinação de resistores, indutores e capacitores. Na Figura 4, ilustram-se resistor (R), indutor (L) e capacitor (C).

Figura 4 – Elementos (a) resistivos, (b) indutivos e (c) capacitivos



Os filtros ativos são compostos de elementos ativos, amplificador operacional realimentado, combinado com capacitores e resistores. Já os filtros híbridos são compostos pela combinação dos filtros passivos e ativos.

6.2. FILTROS PASSIVOS

Atualmente, a maneira mais comum de se atenuarem as harmônicas é com a instalação de filtros passivos sintonizados para frequências mais baixas e dos filtros passa-alta para as frequências superiores.

Os filtros passivos são considerados de mais fácil construção e com custos mais baixos, o que os tornam mais comuns. Os esquemas existentes para este tipo de filtro são o série e o paralelo, sendo o *shunt* o mais utilizado.

O tipo série funciona filtrando as frequências indesejadas, impedindo a passagem para um determinado equipamento ou evitando sua propagação na rede elétrica. Pela forma como é instalado, submete-se a passagem de toda a corrente do circuito, fato que provoca o encarecimento dos seus componentes, impopularizando o seu uso. Sua construção é feita por meio de um circuito paralelo de indutor e capacitor.

O filtro harmônico *shunt* promove o desvio das correntes harmônicas do sistema para o sistema de aterramento, proporcionando uma melhoria na qualidade da energia elétrica dos circuitos de carga. Como consequência, a instalação elétrica e os equipamentos conectados ao sistema são beneficiados, reduzindo danos pela atenuação na circulação das correntes harmônicas. Seu princípio de funcionamento submete apenas a passagem das correntes harmônicas projetadas, viabilizando sua implantação. São classificados em sintonizados e amortecidos.

Entre os filtros passivos paralelos, os mais comuns são de sintonia simples, de dupla sintonia e os amortecidos de 2ª ordem (LEÃO, 2014).

6.2.1. FILTROS DE SINTONIA

6.2.1.1. SIMPLES

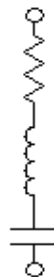
Também conhecidos como filtros *shunt* ressonantes, caracterizam-se por serem filtros passa-faixa, proporcionando uma redução da impedância para a frequência que se deseje filtrar, de modo a desviar as correntes indesejadas para a terra. São os filtros passivos mais utilizados.

São bastante usados nas frequências harmônicas que apresentam maiores amplitudes, abrangendo geralmente as harmônicas mais baixas (3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª). Uma de suas

características é contribuir para a correção do fator potência, tendo em vista que para frequências abaixo da sintonia a impedância do filtro se comporta de forma capacitiva.

A Figura 5 mostra a configuração do filtro passivo de sintonia simples.

Figura 5 – Filtro passivo de sintonia simples



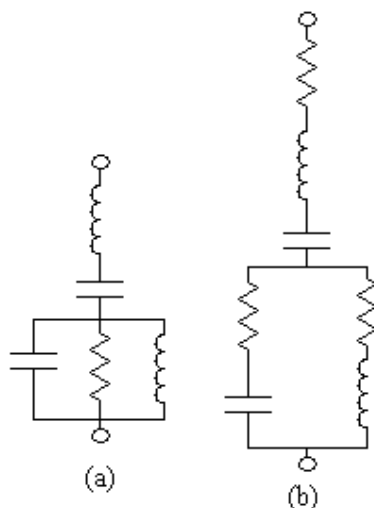
Para o caso em estudo, a sintonia do filtro será realizada para as frequências desejadas, resultando assim em baixas resistências nos circuitos equivalentes, pois as reatâncias capacitivas, nesses casos, se anulam com as reatâncias indutivas para as frequências desejadas. No Item 8.3 há um exemplo detalhado da escolha de sintonia do filtro com a determinação de seus componentes.

6.2.1.2. DUPLA SINTONIA

É um filtro cujo custo benefício é mais atraente, pois possui característica de sintonia para duas frequências ao mesmo tempo. Para esses ajustes, as impedâncias são baixas. Os elementos em série sintonizam uma frequência ressonante e os elementos em paralelo com impedância igual aos elementos série sintonizam a segunda frequência.

A Figura 6 (a e b) mostra as configurações do filtro passivo de dupla sintonia.

Figura 6 – Filtros passivos de dupla sintonia

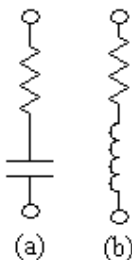


6.2.1.3. AMORTECIDO

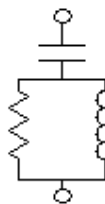
Os filtros amortecidos são formados por capacitores, indutores e resistores em diferentes instalações e caracterizam-se por possuírem baixa impedância para frequências maiores que uma determinada frequência de corte. Na frequência fundamental são capacitivos.

São classificados em filtros amortecidos de 1ª ordem, de 2ª ordem, de 3ª ordem e filtro tipo “C”.

Os filtros de 1ª ordem apresentam altas perdas de energia na frequência fundamental e requerem capacitores robustos, por isso são menos usados na prática. Entretanto, são estudados como filtros passa-baixa ou passa-alta. São ilustrados na Figura 7 (a e b).

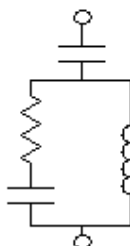
Figura 7 – Filtros amortecidos de 1ª ordem

Os filtros de 2ª ordem são mais usados na prática na indústria por possuírem melhor desempenho na filtragem, todavia, se comparados aos filtros de 3ª ordem, apresentam perdas maiores. São compostos basicamente por um capacitor em série com um reator e um resistor em paralelo, como mostra a Figura 8. São comuns as aplicações em que há a correção das harmônicas 7ª ou 11ª e todas as demais acima destas. Possui um resistor que pode ser ajustado para atenuar uma possível ressonância paralela.

Figura 8 – Filtro amortecido de 2ª ordem

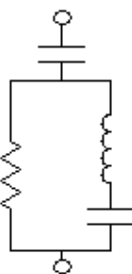
Os filtros de 3ª ordem possuem menos perdas para a frequência fundamental em comparação aos filtros de 2ª ordem. Sua aplicação dá-se em circuitos de maiores potências. Sua construção é bastante parecida com a do filtro de 2ª ordem com o acréscimo de um banco capacitivo em série com o resistor (Figura 9), o que provoca uma redução nas perdas na frequência fundamental. Uma característica desse filtro é a possibilidade de ajuste do banco de capacitor, que está no ramo do resistor, de modo a reduzir a impedância na frequência de ressonância paralela.

Figura 9 – Filtro amortecido de 3ª ordem



O filtro tipo C apresenta maior redução das perdas para a frequência fundamental dentre todos os demais filtros amortecidos e apresenta diversas aplicações industriais. Seu desempenho de filtragem está entre os filtros de 2ª e 3ª ordem. Uma de suas principais características é a maior suscetibilidade a desvios na frequência fundamental e a variações nos valores dos componentes. A Figura 10 ilustra sua configuração.

Figura 10 – Filtro amortecido do tipo C



Leão (2014) informa que os filtros sintonizados e amortecidos muitas vezes são aplicados em conjunto para mitigar correntes harmônicas de uma carga não linear. Cita como exemplo prático um conversor estático de seis pulsos para o qual são projetados quatro filtros sintonizados nas frequências de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens e um filtro passa-alta com frequência de sintonia no 17º harmônico. Nesse caso, o filtro amortecido passa-alta será responsável por amortecer os harmônicos de ordens superiores. Diferencia também os harmônicos de ordens

mais elevadas que, na maior parte das vezes, possuem amplitudes menores, no entanto, vale destacar que podem causar interferências em sistemas de telecomunicações, e também devem ser atenuados.

6.3. FILTROS ATIVOS

Seu princípio de funcionamento é por meio da injeção de correntes harmônicas que proporcionem a anulação das correntes harmônicas existentes no sistema, podendo ser usados na configuração série ou paralela. Esses filtros operam analisando as grandezas elétricas do sistema continuamente, de modo que os sinais gerados tenham os mesmos módulos e sejam defasados em 180° das harmônicas originais geradas nas cargas, efetuando, assim, a anulação das harmônicas indesejadas.

Os filtros ativos em série funcionam analogamente a uma fonte de tensão controlada e proporcionam uma tensão puramente senoidal para a alimentação das cargas. Uma das características adicionais é a capacidade de compensar a corrente reativa.

Já o filtro ativo em paralelo possui características análogas a uma fonte de corrente controlada, pois atua de modo a eliminar as harmônicas de corrente para a carga, fazendo com que a corrente de alimentação seja puramente senoidal.

6.4. FILTROS HÍBRIDOS

São compostos pela combinação dos filtros passivos em paralelo com filtros ativos em série ou paralelo. O intuito dessa combinação é melhorar a capacidade de filtragem de ambos os filtros e atuar explorando as melhores características de cada tipo. Uma característica

adicional é a redução do dimensionamento do filtro ativo, fazendo com que seu custo se reduza.

Os filtros passivos são utilizados para a filtragem de poucas harmônicas definidas e os filtros ativos vão além e promovem também a correção do fator de potência, balanceamento de carga e a absorção da corrente harmônica.

7. INTRODUÇÃO AOS HARMÔNICOS

A qualidade da energia elétrica está relacionada não somente às características de geração, mas também às das cargas ligadas nas redes. Sabe-se que tanto a corrente de carga influencia na tensão de suprimento, quanto a tensão de suprimento influencia diretamente na corrente das cargas.

Cargas lineares produzem correntes não distorcidas quando energizadas por uma fonte não distorcida (senoidal). Se uma tensão distorcida é aplicada sobre uma carga linear, a forma de onda da corrente na carga será distorcida como a tensão. Entretanto, se uma carga não linear é alimentada por uma tensão não senoidal, a forma de onda da corrente será distorcida por causa da tensão distorcida e da não linearidade da carga. Em quaisquer desses casos, a relação entre tensão e corrente não é constante (LEÃO, 2014).

Uma carga que afete diretamente as harmônicas de corrente do sistema produz como consequência efeitos sobre as harmônicas de tensão, sendo estas relacionadas também às impedâncias do sistema, reatâncias das linhas e dos equipamentos ligados nas redes.

No caso de uma carga ser alimentada por tensões não senoidais, mesmo que essa carga seja linear haverá a propagação de correntes harmônicas, por consequência das distorções de tensão.

O objetivo no fornecimento de energia elétrica é a obtenção de ondas puramente senoidais, pois é como os equipamentos são dimensionados para operarem. Todavia, devido às harmônicas encontradas nos sistemas, é uma situação muito difícil de ser encontrada na prática.

A deformação das ondas é consequência do somatório das diversas ondas múltiplas senoidais, ondas harmônicas, com a onda da frequência fundamental (componente de ordem frequência inteira mais baixa e cujo módulo apresenta o maior valor).

Cada ordem harmônica significa um múltiplo da frequência fundamental. Por exemplo, em alguns locais temos a frequência fundamental em 60 Hz, as frequências harmônicas múltiplas representam o valor da sua ordem vezes o valor da frequência fundamental. Nesse exemplo, a harmônica décima seria uma frequência de 600 Hz.

Leão (2014) relata que estudos harmônicos são feitos com a intenção de averiguar o impacto de dispositivos não lineares, calcular os níveis de distorção harmônica, detectar condições em que possa haver ressonância e determinar requisitos de filtragem em uma instalação ou mesmo no sistema elétrico.

É preciso também efetuar uma análise gráfica das impedâncias pelas frequências, de modo a serem avaliadas as ressonâncias séries e paralelas, visualizar o comportamento dos filtros e dos sistemas. Na ocorrência da ressonância série, o circuito apresenta a menor impedância possível, pois, nesse ajuste a reatância indutiva anula a reatância capacitiva, restando apenas a parcela resistiva do circuito. A ressonância paralela ocorre com um forte aumento da impedância.

8. MEMORIAL DE CÁLCULO - PROJETO DOS FILTROS HARMÔNICOS

8.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O projeto dos filtros sintonizados de frequência simples *shunt* considera a necessidade de suprimento da energia reativa baseada nas demandas do complexo do Jiqui, que contempla diversas estações elevatórias.

A medição de energia elétrica para fins de faturamento por parte da concessionária é única para todo o complexo do Jiqui, que conta com as principais cargas listadas na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Relação das principais cargas em operação na Estação do Jiqui

Localização	Tipo da carga	Quantidade em operação simultânea	Potência Ativa (W)
EEAB	Motor	2	184.000
EEAT I	Motor	1	515.200
EEAT II	Motor	2	588.800
Poço Tubular	Motobomba	7	206.080
ETA	Outros	50	25.000
TOTAL	-	62	1.519.080

Vale frisar que a subestação em estudo, 2x300 kVA, não é responsável pelo suprimento de todas as cargas trazidas na Tabela 9, apenas daquelas ilustradas na Figura 1, ou seja, os transformadores na subestação estudada estão operando com folga. Para as demais cargas, existem outras subestações com características diferentes.

Considerando as últimas medições no mês de abril/2015, em que o fator de potência da instalação total da Estação do Jiqui encontra-se em 0,93, a potência reativa indutiva total em operação está em aproximadamente 600,4 kvar.

Para o desenvolvimento deste projeto, considerou-se a instalação de 75 kvar de potência reativa dos capacitores dos filtros, sem considerar, inicialmente, a influência dos

reatores dos filtros e da presença das correntes harmônicas existentes. Levando-se em conta uma aproximação da potência do banco capacitivo trifásico de 75 kvar, o fator de potência da instalação sofreria uma alteração de 0,93 para 0,945.

Essa nova situação provoca um maior conforto na manutenção dos níveis tolerados na legislação brasileira para o fator de potência em relação ao funcionamento atual do sistema.

Sabe-se que nesse caso prático existem inconsistências nas harmônicas de corrente de ordens 7^a, 11^a e 13^a para a Norma europeia IEC 61000-3-4 e nas ordens 7^a e 11^a para a Norma americana IEEE-519. Contudo, mesmo com a taxa de distorção harmônica dentro dos limites normativos, haverá também o projeto para a harmônica de ordem 5^a com o objetivo de aperfeiçoar ainda mais a distorção harmônica total. Assim, o grau de qualidade de energia elétrica do sistema se tornará ainda melhor.

Para IEEE Std. 1531 (2003 apud LEÃO, R. et al., 2014, p. 313):

Com base no espectro de harmônicos, em geral o filtro harmônico é sintonizado para a menor frequência entre as mais significantes do espectro. Na prática, a frequência de sintonia é selecionada como sendo de 3% a 15% abaixo da desejada, sendo esse percentual denominado “fator de dessintonia” d .

Nascimento (2015) aduz que a dessintonia faz com que a frequência do filtro se torne sempre um pouco abaixo ou acima da ordem harmônica que se deseja. Exemplifica que caso um filtro seja projetado para sintonia em uma dada frequência harmônica, uma variação nos valores de impedância do equipamento poderá alterar a sintonia do filtro e permitir que a frequência ressonante paralela fique muito próxima da harmônica para qual ele foi sintonizado. Em suma, a dessintonia evita que um filtro sintonizado, ao perder suas características elétricas originais de projeto, por desgaste dos componentes, por exemplo, passe a ter característica capacitiva na frequência de sintonia. Caso isso venha a ocorrer, o fenômeno da ressonância paralela pode aparecer com a impedância do sistema de distribuição ou industrial, que quase sempre é indutiva.

O objetivo principal do projeto é controlar os harmônicos encontrados nos sistemas, de tal maneira que se enquadrem nos limites estabelecidos nas normas existentes. No caso em estudo, optou-se por uma dessintonia de 3%.

O fator de qualidade (Q) é determinante para a escolha da largura da banda passante e na determinação do grau de seletividade do filtro. A Equação 1 revela o dimensionamento da resistência (R) do circuito com base no valor do indutor (L), capacitor (C) e fator de qualidade.

$$R = \frac{L}{CQ} \quad (1)$$

Para Leão, R. et al. (2014, p. 310), “O fator de qualidade é um importante parâmetro relacionado aos filtros harmônicos. Os filtros sintonizados são filtros passa-banda com alto fator de qualidade, em geral compreendido entre 20 e 80, aplicados para filtrar harmônicas de baixa ordem.”

Segundo a mesma autora, tem-se que para sistemas em baixa tensão não é usual colocar resistores nos circuitos dos filtros harmônicos de sintonia simples e que, nesses casos, considera-se apenas a resistência do próprio indutor. Ao mesmo tempo, a não aplicação de resistores ao circuito faz com que haja menos perdas por efeito Joule e proporciona melhor sintonia ao circuito.

Todavia, o projeto inicial considerou um fator de qualidade de 50, por ser um valor intermediário. Depois foram considerados os valores de 20 e 80 para fins de comparação.

8.2. DIMENSIONAMENTO DOS CAPACITORES

Conforme demonstrado por Hsia (2001), os filtros harmônicos podem também fornecer um grande percentual de energia reativa para correção do fator de potência. Quando o capacitor Q_{com} é instalado em um sistema com a carga real P , o fator de potência pode ser corrigido de pf_0 para pf_1 ,

onde

$$Q_{com} = P \times \left(\tan(\cos^{-1} pf_0) - \tan(\cos^{-1} pf_1) \right) \quad (2)$$

Q_{com} é a potência reativa do capacitor instalado;

P é a potência ativa da carga;

pf_0 é o fator de potência antes da instalação do capacitor;

pf_1 é o fator de potência depois da instalação do capacitor.

Na condição da instalação de apenas um filtro de sintonia única, a capacidade do filtro pode ser dada pela Equação 3 a seguir:

$$Q_f = Q_{com} \quad (3)$$

Para múltiplos filtros de sintonia única em paralelo o capacitor correspondente para cada ordem harmônica (h) pode ser desenvolvido aproximadamente por meio da Equação 4.

$$Q_{fh} = Q_{com} \times \frac{1}{\sum I_h^2}, \quad h = 2, 3, \dots \quad (4)$$

Onde I_h denota a corrente harmônica da frequência h e Q_{fh} representa a capacidade correspondente ao filtro harmônico da respectiva frequência.

Assim, de acordo com a Equação 4, foram considerados os seguintes dimensionamentos de bancos trifásicos por frequência harmônica:

5ª Harmônica

$$Q_{f5} = 75 \times \frac{11}{(1 + 11 + 25 + 1,7 + 11,9 + 3,1 + 0,1 + 0,8 + 0,2 + 0,2 + 0,1 + 0,1)}$$

$$Q_{f5} = 14,95 \text{ kvar}$$

7ª Harmônica

$$Q_{f7} = 75 \times \frac{25}{(1 + 11 + 25 + 1,7 + 11,9 + 3,1 + 0,1 + 0,8 + 0,2 + 0,2 + 0,1 + 0,1)}$$

$$Q_{f7} = 33,97 \text{ kvar}$$

11ª Harmônica

$$Q_{f11} = 75 \times \frac{11,9}{(1 + 11 + 25 + 1,7 + 11,9 + 3,1 + 0,1 + 0,8 + 0,2 + 0,2 + 0,1 + 0,1)}$$

$$Q_{f11} = 16,17 \text{ kvar}$$

13ª Harmônica

$$Q_{f13} = 75 \times \frac{3,1}{(1 + 11 + 25 + 1,7 + 11,9 + 3,1 + 0,1 + 0,8 + 0,2 + 0,2 + 0,1 + 0,1)}$$

$$Q_{f13} = 4,21 \text{ kvar}$$

Ressalta-se que para cada capacitor trifásico dimensionado foram consideradas as correntes harmônicas ímpares partindo da 3ª até a 25ª ordem, pois a contribuição das harmônicas de correntes pares é ínfima para a EEAB do Jiqui. Com base nos cálculos feitos para cada frequência harmônica, haverá a instalação total de capacitores no valor de 69,3 kvar nos filtros sintonizados.

8.3. MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 5ª HARMÔNICA

Após o dimensionamento da potência reativa do capacitor para cada frequência harmônica a se filtrar, conforme Equação 4, é calculada a ordem harmônica de sintonia na Equação 5, para que, com a Equação 6 e 7 sejam calculados os valores das reatâncias capacitivas e indutivas do filtro.

$$h_{r,z} = h_{s,z} = (h - d)^2 \quad (5)$$

$$= (5 - 0,03 * 5)^2 = 23,5225$$

Onde,

h é a ordem harmônica a ser filtrada;

d é o fator de dessintonia, considerado 3% neste projeto;

h_r é a ordem harmônica de dessintonia.

$$Q_{F,1} \cong (V_L)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1}) \quad (6)$$

$$14,95 \text{ kVAr} = (380)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

Onde,

$Q_{F,1}$ é a potência projetada para o capacitor;

V_L é a tensão de linha da rede;

$X_{C,1}$ é a reatância capacitiva do filtro na frequência fundamental;

$X_{L,1}$ é a reatância indutiva do filtro na frequência fundamental.

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{r^2} \quad (7)$$

$$\rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / 23,5225 \rightarrow x_{L,1} = 0,0425124880434x_{C,1}$$

$$14,95 \text{ kVAr} = (380)^2 / (x_{C,1} - 0,0425124880434x_{C,1})$$

$$14,95 \text{ kVAr} = (380)^2 / (0,957487511957x_{C,1})$$

$$x_{C,1} = 10,0906514253 \Omega$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{r^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / (h - d)^2 = 10,0906514253 / 23,5225$$

$$\rightarrow x_{L,1} = 0,428978698068 \Omega$$

Após serem calculadas as reatâncias capacitiva e indutiva do filtro, $X_{C,1}$ e $X_{L,1}$, encontra-se o valor da reatância efetiva do filtro na frequência fundamental ($X_{F,1}$). $X_{F,1}$ pode ser encontrado pelo somatório das reatâncias indutiva e capacitiva, pois a reatância equivalente é de um circuito em série, como também pode ser encontrada por meio da Equação 6, apenas substituindo os valores da tensão de rede de linha e a respectiva potência reativa trifásica.

$$Q_{F,1} = (V_L)^2/x_{F,1} \rightarrow x_{F,1} = (380)^2/(14,95k)$$

$$x_{F,1} = 9,66167272728 \Omega$$

Onde,

$X_{F,1}$ é a reatância efetiva do filtro na frequência fundamental.

Após encontrar o valor de $X_{C,1}$, usa-se a Equação 8 para achar o valor do capacitor do filtro, explicitado abaixo.

$$x_{C,1} = 10,0906514253 = 1 / 2 * \pi * f * C, \quad (8)$$

Considerando,

o π igual a 3,141593;

C é a capacitância;

f (frequência da rede) igual a 60 Hz.

$$C = 1/3804,08638598 \rightarrow C = 262,875208009 \mu\text{F}$$

Com o valor de $X_{L,1}$, utiliza-se a Equação 9, abaixo, para calcular o valor da indutância do filtro.

$$x_L = \omega L \rightarrow 0,428978698068 = 2 * \pi * 60 * L \quad (9)$$

$$L = 1,13790121251 \times 10^{-3} \text{ H}$$

Os valores encontrados de L e C, já determinam as especificações básicas dos equipamentos a serem instalados. Faz-se o uso dessas informações também para o cálculo do fator de qualidade a ser aplicado no circuito. O projeto para a Estação Elevatória do Baixo Recalque do Jiqui, 3 valores de fator de qualidade (20, 50 e 80) são considerados. Por meio da Equação 1, são calculados os valores dos resistores a serem instalados em série.

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (1)$$

Para Q=50, R=0,0416109337128 Ω

Para Q=20, R=0,104027334282 Ω

Para Q=80, R=0,0260068335705 Ω

Teste de desempenho do filtro da 5ª harmônica

É calculada a corrente da frequência fundamental ($I_{F(1)}$) para o tipo de conexão do filtro, conforme Equação 10. Ressalta-se, a desconsideração dos valores das resistências encontradas, por possuírem valores mínimos, sabendo que não haverá influência significativa no resultado final.

$$I_{F(1)} = V_s / (x_C - x_L) \quad (10)$$

$$I_{F(1)} = (380/\sqrt{3}) / (10,09 - 0,43) = 22,71 \text{ A}$$

Onde,

V_s é a tensão sobre o filtro

X_c é a reatância capacitiva na frequência fundamental

X_L é a reatância indutiva na frequência fundamental

Temos que as seguintes correntes harmônicas a serem atenuadas:

- 5ª harmônica: 11 A;
- 7ª harmônica: 25 A;
- 11ª harmônica: 11,9 A;
- 13ª harmônica: 3,1 A.

Com base nesses dados, calcula-se, por meio da Equação 11, a corrente total *rms*.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{H=1}^{H \text{ máximo}} I_H^2} \quad (11)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{22,71^2 + 11^2 + 25^2 + 11,9^2 + 3,1^2}$$

$$I_{RMS} = 37,59 \text{ A}$$

A tensão no capacitor na frequência fundamental é dada pela Equação 12.

$$V_{C(1)} = I_{F(1)} * X_c \quad (12)$$

$$V_{C(1)} = 22,71 * 10,09 = 229,14 \text{ V}$$

A tensão das harmônicas no capacitor é dada pela Equação 13.

$$V_{C(H)} = \sum_H I_{F(H)} * \left(\frac{X_c}{H}\right) \quad (13)$$

$$V_{C(H)} = 11 * \frac{10,09}{5} + 25 * \frac{10,09}{7} + 11,9 * \frac{10,09}{11} + 3,1 * \frac{10,09}{13}$$

$$V_{C(H)} = 22,2 + 36,03 + 10,92 + 2,41 = 71,56 \text{ V}$$

A tensão nominal do capacitor é calculada pela Equação 14.

$$V_R = [V_{C(L)} + V_{C(H)}] \quad (14)$$

$$V_R = 229,14 + 71,56 = 300,7 \text{ V}$$

A tensão nominal dos capacitores dos filtros é maior que a requerida para um banco capacitivo comum em derivação. Isso se dá porque a tensão para a frequência fundamental aumenta através do reator de sintonia. A razão para tal é que a corrente harmônica fundamental que flui pelo reator cresce (IEEE Std. 1531, 2003).

Logo, a tensão de fase do capacitor deverá ser coerente com a tensão V_r .

Salienta-se que o capacitor pode operar continuamente com uma sobretensão de 10% sobre a tensão nominal, conforme (IEEE Std. 1036, 1992).

Sendo assim, a real potência reativa trifásica (Q_R) fornecida pelo filtro será dada pela Equação 15.

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * V_R)^2}{x_C} \quad (15)$$

$$= \frac{(\sqrt{3} * 300,7)^2}{10,09} = 26,8 \text{ kvar}$$

Nota-se que a potência reativa do filtro é maior que a potência do banco capacitivo, isso se dá porque a tensão do sistema também é maior.

A Equação 16 revela a forma de se calcular a corrente nominal do capacitor do filtro, I_{NOM} .

$$I_{NOM} = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_R} \quad (16)$$

$$I_{NOM} = \frac{26,8 \text{ k}}{\sqrt{3} * (\sqrt{3} * 300,7)} = 29,8 \text{ A}$$

De acordo com (IEEE Std. 1036, 1992), a corrente total *rms* que flui através do filtro deve ser menor que 135% da corrente nominal do filtro, conforme inequação 17 abaixo.

$$I_{RMS} \leq 1,35 * I_{NOM} \quad (17)$$

$$37,59 \leq 29,8 * 1,35$$

$$37,59 \leq 40,23$$

Por fim, o teste final do projeto do filtro harmônico é verificar a conformidade do aquecimento dielétrico do capacitor do filtro harmônico. Sua avaliação é dada pela inequação 18 dada na sequência.

$$\left| \sum_H V_H * I_H \right| \leq |1,35 * Q_R| \quad (18)$$

$$|3 * (229,14 * 22,71 + 22,2 * 11 + 36,03 * 25 + 10,92 * 11,9 + 2,41 * 3,1)| \leq |1,35 * 26,8 \text{ k}|$$

$$|19,5 \text{ k}| \leq |36,18 \text{ k}|$$

8.4. MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 7ª HARMÔNICA

$$h_{r^2} = h_{7^2} = (h - d)^2 = (7 - 0,03 * 7)^2 = 46,1041$$

$$Q_{F,1} \cong (V_L)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$33,97 \text{ kVAr} = (380)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{7^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / 46,1041 \rightarrow x_{L,1} = 0,0216900449201 x_{C,1}$$

$$33,97 \text{ kVAr} = (380)^2 / (x_{C,1} - 0,0216900449201 x_{C,1})$$

$$33,97 \text{ kVAr} = (380)^2 / (0,97830995508 x_{C,1})$$

$$x_{C,1} = 4,34538765339 \Omega$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{r^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / (h - d)^2 = 4,34538765339 / 46,1041$$

$$x_{L,1} = 0,0942516533972 \Omega$$

$$Q_{F,1} = (V_L)^2 / x_{F,1} \rightarrow x_{F,1} = (380)^2 / (33,97k)$$

$$x_{F,1} = 4,25113599999 \Omega$$

$$x_{C,1} = 4,34538765339 = 1 / 2 * \pi * f * C,$$

$$C = 1/1638,1727321 \rightarrow C = 610,436238136 \mu\text{F}$$

$$x_{L,1} = \omega L \rightarrow 0,0942516533972 = 2 * \pi * 60 * L$$

$$L = 0,250010247978 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q},$$

$$\text{Para } Q=50, R=0,0127993745313 \Omega$$

$$\text{Para } Q=20, R=0,0319984363283 \Omega$$

$$\text{Para } Q=80, R=0,00799960908208 \Omega$$

Teste de desempenho do filtro da 7ª harmônica

$$I_{F(1)} = V_s / (x_C - x_L)$$

$$I_{F(1)} = (380/\sqrt{3}) / (4,35 - 0,09) = 51,61 \text{ A}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{H=1}^{H \text{ máximo}} I_H^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{51,61^2 + 11^2 + 25^2 + 11,9^2 + 3,1^2}$$

$$I_{RMS} = 59,67 \text{ A}$$

$$V_{C(1)} = I_{F(1)} * X_c$$

$$V_{C(1)} = 51,61 * 4,35 = 224,27 \text{ V}$$

$$V_{C(H)} = \sum_H I_{F(H)} * \left(\frac{X_c}{H}\right)$$

$$V_{C(H)} = 11 * \frac{4,35}{5} + 25 * \frac{4,35}{7} + 11,9 * \frac{4,35}{11} + 3,1 * \frac{4,35}{13}$$

$$V_{C(H)} = 9,57 + 15,54 + 4,71 + 1,04 = 30,85 \text{ V}$$

$$V_R = [V_{C(1)} + V_{C(H)}]$$

$$V_R = 224,27 + 30,85 = 225,12 \text{ V}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * V_R)^2}{X_c}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * 225,12)^2}{4,35} = 34,951 \text{ kvar}$$

$$I_{NOM} = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_R}$$

$$I_{NOM} = \frac{34,951 \text{ k}}{\sqrt{3} * (\sqrt{3} * 300,7)} = 51,75 \text{ A}$$

$$I_{RMS} \leq 1,35 * I_{NOM}$$

$$59,67 \leq 51,75 * 1,35$$

$$59,67 \leq 69,86$$

$$\left| \sum_H V_H * I_H \right| \leq |1,35 * Q_R|$$

$$|3 * (224,27 * 51,61 + 9,57 * 11 + 15,54 * 25 + 4,71 * 11,9 + 1,04 * 3,1)| \\ \leq |1,35 * 34,951 \text{ k}|$$

$$|36,38 \text{ k}| \leq |47,18 \text{ k}|$$

8.5. MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 11ª HARMÔNICA

$$h_{r,2} = h_{11^2} = (h - d)^2 = (11 - 0,03 * 11)^2 = 113,8489$$

$$Q_{F,1} \cong (V_L)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$16,17 \text{ kVar} = (380)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{11^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / 113,8489 \rightarrow x_{L,1} = 0,00878357190979 x_{C,1}$$

$$16,17 \text{ kVar} = (380)^2 / (x_{C,1} - 0,00878357190979 x_{C,1})$$

$$16,17 \text{ kVar} = (380)^2 / (0,99121642809 x_{C,1})$$

$$x_{C,1} = 9,01009883421 \Omega$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{r^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / (h \quad d)^2 = 9,01009883421 / 113,8489$$

$$x_{L,1} = 0,0791408510246 \quad \Omega$$

$$Q_{F,1} = (V_L)^2 / x_{F,1} \rightarrow x_{F,1} = (380)^2 / (16,17k)$$

$$x_{F,1} = 8,93095798318 \quad \Omega$$

$$x_{C,1} = 9,01009883421 = 1 / 2 * \pi * f * C,$$

$$C = 1 / 732,26555387 \rightarrow C = 294,400998389 \quad \mu F$$

$$x_L = \omega L \rightarrow 0,0791408510246 = 2 * \pi * 60 * L$$

$$L = 2,09927604203 \times 10^{-4} \quad H$$

$$R = \frac{\sqrt{E}}{Q},$$

$$\text{Para } Q=50, R=0,0168886576086 \quad \Omega$$

$$\text{Para } Q=20, R=0,0422216440216 \quad \Omega$$

$$\text{Para } Q=80, R=0,0105554110054 \quad \Omega$$

Teste de desempenho do filtro da 11ª harmônica

$$I_{F(1)} = V_s / (X_C - X_L)$$

$$I_{F(1)} = (380/\sqrt{3})/(8,93) = 24,57 \text{ A}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{H=1}^{H \text{ máximo}} I_H^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{24,57^2 + 11^2 + 25^2 + 11,9^2 + 3,1^2}$$

$$I_{RMS} = 38,74 \text{ A}$$

$$V_{C(1)} = I_{F(1)} * X_C$$

$$V_{C(1)} = 24,57 * 9,01 = 221,38 \text{ V}$$

$$V_{C(H)} = \sum_H I_{F(H)} * \left(\frac{X_C}{H}\right)$$

$$V_{C(H)} = 11 * \frac{9,01}{5} + 25 * \frac{9,01}{7} + 11,9 * \frac{9,01}{11} + 3,1 * \frac{9,01}{13}$$

$$V_{C(H)} = 19,82 + 32,18 + 9,75 + 2,15 = 63,89 \text{ V}$$

$$V_R = [V_{C(1)} + V_{C(H)}]$$

$$V_R = 221,38 + 63,89 = 285,28 \text{ V}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * V_R)^2}{X_C}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * 285,28)^2}{9,01} = 27,097 \text{ kvar}$$

$$I_{NOM} = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_R}$$

$$I_{NOM} = \frac{27,097 \text{ k}}{\sqrt{3} * (\sqrt{3} * 285,28)} = 31,66 \text{ A}$$

$$I_{RMS} \leq 1,35 * I_{NOM}$$

$$38,74 \leq 31,66 * 1,35$$

$$38,74 \leq 42,74$$

$$\left| \sum_H V_H * I_H \right| \leq |1,35 * Q_R|$$

$$|3 * (221,38 * 24,57 + 19,82 * 11 + 32,18 * 25 + 9,75 * 11,9 + 2,15 * 3,1)|$$

$$\leq |1,35 * 27,097 \text{ k}|$$

$$|19,753 \text{ k}| \leq |36,581 \text{ k}|$$

8.6. MEMORIAL DE CÁLCULO PARA A 13ª HARMÔNICA

$$h_{r^2} = h_{13^2} = (h - d)^2 = (13 - 0,03 * 13)^2 = 159,0121$$

$$Q_{F,1} \cong (V_L)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$4,21 \text{ kVar} = (380)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{13^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / 159,0121 \rightarrow x_{L,1} = 0,00628882959221 x_{C,1}$$

$$4,21 \text{ kVar} = (380)^2 / (x_{C,1} - 0,00628882959221x_{C,1})$$

$$4,21 \text{ kVar} = (380)^2 / (0,993711170408x_{C,1})$$

$$x_{C,1} = 34,5003214813 \Omega$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_r^2 \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / (h - d)^2 = 34,5003214813 / 159,0121$$

$$x_{L,1} = 216,966642672 \text{ m} \Omega$$

$$Q_{F,1} = (V_L)^2 / x_{F,1} \rightarrow x_{F,1} = (380)^2 / (4,21k)$$

$$x_{F,1} = 34,2833548387 \Omega$$

$$x_{C,1} = 34,5003214813 = 1 / 2 * \pi * f * C,$$

$$C = 76,8774743372 \mu\text{F}$$

$$x_L = \omega L \rightarrow 216,966642672 \times 10^{-3} = 2 * \pi * 60 * L$$

$$L = 5,75521830995 \times 10^{-4} \text{ H}$$

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q},$$

Para Q=50, R=0,0547219220676 Ω

Para Q=20, R=0,136804805169 Ω

Para Q=80, R=0,0342012012922 Ω

Teste de desempenho do filtro da 13ª harmônica

$$I_{F(1)} = V_S / (X_C - X_L)$$

$$I_{F(1)} = (380/\sqrt{3})/(34,28) = 6,40 \text{ A}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{H=1}^{H \text{ máximo}} I_H^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{6,40^2 + 11^2 + 25^2 + 11,9^2 + 3,1^2}$$

$$I_{RMS} = 30,63 \text{ A}$$

$$V_{C(1)} = I_{F(1)} * X_C$$

$$V_{C(1)} = 6,4 * 34,5 = 220,8 \text{ V}$$

$$V_{C(H)} = \sum_H I_{F(H)} * \left(\frac{X_C}{H}\right)$$

$$V_{C(H)} = 11 * \frac{34,5}{5} + 25 * \frac{34,5}{7} + 11,9 * \frac{34,5}{11} + 3,1 * \frac{34,5}{13}$$

$$V_{C(H)} = 75,9 + 123,21 + 37,32 + 8,23 = 244,66 \text{ V}$$

$$V_R = [V_{C(1)} + V_{C(H)}]$$

$$V_R = 220,8 + 244,66 = 465,46 \text{ V}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * V_R)^2}{X_C}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * 465,46)^2}{34,50} = 18,839 \text{ kvar}$$

$$I_{NOM} = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_R}$$

$$I_{NOM} = \frac{18,839 \text{ k}}{\sqrt{3} * (\sqrt{3} * 465,46)} = 13,49 \text{ A}$$

$$I_{RMS} < 1,35 * I_{NOM}$$

$$38,74 \leq 13,49 * 1,35$$

$$38,74 \leq 18,21 \Rightarrow \text{Não atende à exigência!}$$

$$\left| \sum_H V_H * I_H \right| \leq |1,35 * Q_R|$$

$$|3 * (220,8 * 6,4 + 75,9 * 11 + 123,21 * 25 + 37,32 * 11,9 + 8,23 * 3,1)|$$

$$\leq |1,35 * 18,84 \text{ k}|$$

$$|17,393 \text{ k}| \leq |25,433 \text{ k}|$$

A fim de atender a todas as exigências, foi realizado um novo projeto para a 13ª harmônica, considerando uma potência reativa do banco de capacitor de 10 kvar, condição sob a qual a soma das contribuições das potências dos capacitores dos filtros no sistema será de 75 kvar.

$$h_{13^2} = h_{13^2} = (h - d)^2 = (13 - 0,03 * 13)^2 = 159,0121$$

$$Q_{F,1} \cong (V_L)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$10 \text{ kVar} = (380)^2 / (x_{C,1} - x_{L,1})$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{13^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / 159,0121 \rightarrow x_{L,1} = 0,00628882959221 x_{C,1}$$

$$10 \text{ kVar} = (380)^2 / (x_{C,1} - 0,00628882959221 x_{C,1})$$

$$10 \text{ kVar} = (380)^2 / (0,993711170408 x_{C,1})$$

$$x_{C,1} = 14,5313854066 \Omega$$

$$x_{L,1} = x_{C,1} / h_{13^2} \rightarrow x_{L,1} = x_{C,1} / (h - d)^2 = 14,5313854066 / 159,0121$$

$$x_{L,1} = 91,3854065609 \text{ m} \Omega$$

$$Q_{F,1} = (V_L)^2 / x_{F,1} \rightarrow x_{F,1} = (380)^2 / (10\text{k})$$

$$x_{F,1} = 14,44 \Omega$$

$$x_{C,1} = 14,5313854066 = 1 / (2 * \pi * f * C),$$

$$C = 182,541582799 \mu\text{F}$$

$$x_L = \omega L \rightarrow 91,3854065609 \times 10^{-3} = 2 * \pi * 60 * L$$

$$L = 2,42407292948 \times 10^{-4} \text{ H}$$

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q}$$

Para Q=50, R=0,0230473995346 Ω

Para Q=20, R=0,0576184988365 Ω

Para Q=80, R=0,0144046247091 Ω

Teste de desempenho do filtro da 13ª harmônica

$$I_{F(1)} = V_s / (x_C - x_L)$$

$$I_{F(1)} = (380/\sqrt{3})/(14,44) = 15,19 \text{ A}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{H=1}^H \text{máximo } I_F^2}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{15,19^2 + 11^2 + 25^2 + 11,9^2 + 3,1^2}$$

$$I_{RMS} = 33,59 \text{ A}$$

$$V_{C(I)} = I_{F(I)} * X_c$$

$$V_{C(I)} = 15,19 * 14,53 = 487,99 \text{ V}$$

$$V_{C(H)} = \sum_H I_{F(H)} * \left(\frac{X_c}{H} \right)$$

$$V_{C(H)} = 11 * \frac{14,53}{5} + 25 * \frac{14,53}{7} + 11,9 * \frac{14,53}{11} + 3,1 * \frac{14,53}{13}$$

$$V_{C(H)} = 31,97 + 51,89 + 15,72 + 3,47 = 103,04 \text{ V}$$

$$V_R = [V_{C(I)} + V_{C(H)}]$$

$$V_R = 487,99 + 103,04 = 591,03 \text{ V}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * V_R)^2}{X_c}$$

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * 591,03)^2}{14,53} = 72,123 \text{ kvar}$$

$$I_{NOM} = \frac{Q_R}{\sqrt{3} * V_R}$$

$$I_{NOM} = \frac{72,123 \text{ k}}{\sqrt{3} * (\sqrt{3} * 591,03)} = 40,68 \text{ A}$$

$$I_{RMS} \leq 1,35 * I_{NOM}$$

$$33,59 \leq 40,68 * 1,35$$

$$33,59 \leq 54,91 \Rightarrow \text{Atende à exigência!}$$

$$\left| \sum_H V_H * I_H \right| \leq |1,35 * Q_R|$$

$$|3 * (487,99 * 15,19 + 31,97 * 11 + 51,89 * 25 + 15,72 * 11,9 + 3,47 * 3,1)|$$

$$\leq |1,35 * 72,123 \text{ k}|$$

$$|27,778 \text{ k}| \leq |97,366 \text{ k}|$$

Como resultado, haverá uma contribuição em 160 kvar de potência reativa capacitiva pelos filtros. Isso faz com que o fator de potência da instalação saia de 0,93 para 0,96 indutivo.

9. SIMULAÇÕES

Após a elaboração do projeto dos filtros passivos em sintonia com a especificação dos resistores, indutores e capacitores, foram feitas as simulações do sistema completo energizado com a interligação dos equipamentos. Foram estudadas as situações com e sem os filtros instalados, e também com as variações do fator de qualidade. Assim, obtiveram-se os novos valores das distorções harmônicas de tensão e corrente, bem como as formas de onda resultantes.

Foi escolhido o programa HARMZS, com auxílio da ferramenta EDIT CEPTEL para formatação do código e do programa PLOT CEPTEL para a geração dos arquivos gráficos das distorções. O programa SCILAB foi aplicado para a simulação das correntes e tensões.

$$IRMST = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2} \quad (11)$$

$$IRMSH = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2} \quad (19)$$

Sendo I_h a corrente harmônica de ordem h e h_{\max} o número total de harmônicos; IRMST (IRMS) é a corrente através do equipamento selecionado considerando todos os harmônicos das fontes de corrente, considerando a componente fundamental; IRMSH é a corrente através do equipamento selecionado considerando todos os harmônicos das fontes de corrente, desconsiderando a componente fundamental.

O estudo considerou os dados de rede fornecidos pela concessionária mostrados na sequência.

Dados de impedância equivalente Thevenin:

$$Z1 = 0,3875 +j 1,3371 \text{ pu};$$

$$Z0 = 0,6178 +j 2,8316 \text{ pu};$$

Sbase: 100 MVA; Vbase: 13,8 kV.

Os transformadores da CAERN possuem impedância de 4% e os motores apresentam potência de 125 cv.

A Figura 11 demonstra os resultados das simulações feitas para a baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com os dados das correntes harmônicas, refletindo com proximidade os dados coletados por meio de medições feitas *in loco*. Na Tabela 10 são revelados os valores dos módulos de corrente e suas respectivas distorções para cada frequência harmônica simulada na Figura 11.

Figura 11 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados

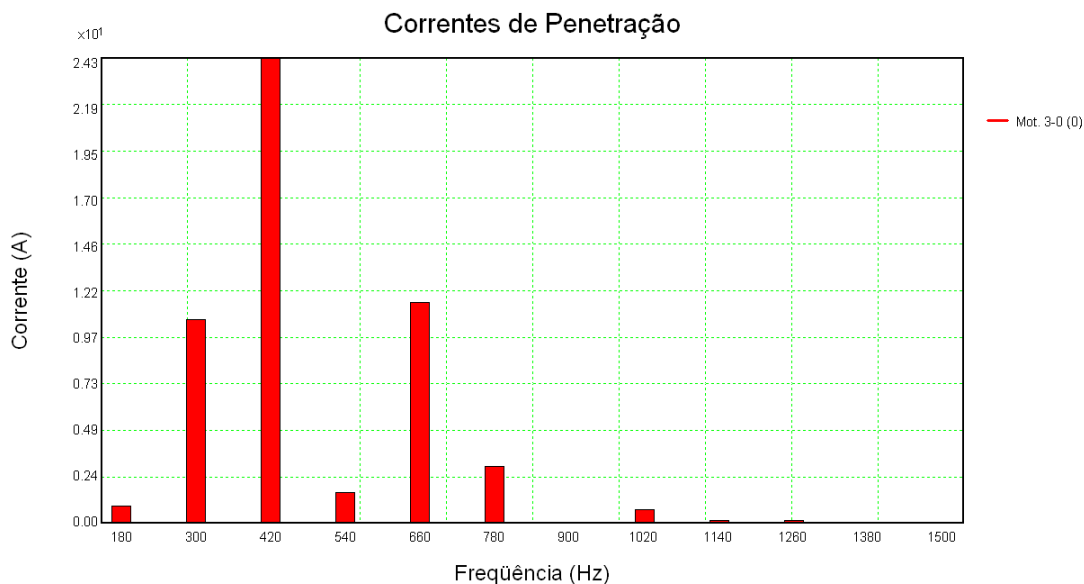


Tabela 10 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados

Ordem	Corrente (A)	Distorção harmônica de corrente
1	125	100,00%
3	0,973	0,78%
5	10,703	8,56%
7	24,325	19,46%
9	1,6541	1,32%
11	11,5787	9,26%
13	3,0163	2,41%
15	0,0973	0,08%
17	0,7784	0,62%
19	0,1946	0,16%
21	0,1946	0,16%
23	0,0973	0,08%
25	0,0973	0,08%
THDi		23,38%

IRMST = 128,37 A

IRMSH = 29,22 A

THDi% = 23,38

A Figura 12 mostra os resultados das simulações feitas para a baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com os dados das correntes harmônicas e com os filtros para as 5^a, 7^a, 11^a e 13^a harmônicas instalados e um fator de dessintonia de 3%, sem considerar o fator de qualidade. Na Tabela 11 seguem os valores dos módulos de corrente e suas respectivas distorções para cada frequência harmônica simulada na Figura 12.

A intenção da simulação desconsiderando o fator de qualidade foi apenas a de estabelecer mais um parâmetro de comparação. O projeto, entretanto, orienta a utilização do fator de qualidade.

Figura 12 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de dessintonia de 3%

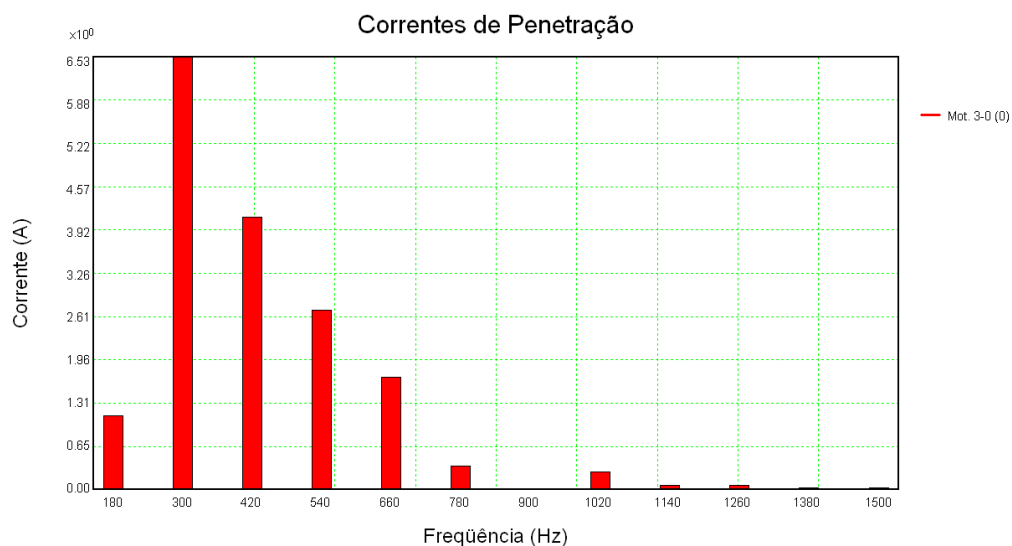


Tabela 11 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados

Ordem	Corrente (A)	Distorção harmônica de corrente
1	125	100,00%
3	1,1297	0,90%
5	6,5290	5,22%
7	4,1180	3,29%
9	2,7265	2,18%
11	1,7145	1,37%
13	0,3786	0,30%
15	0,02952	0,02%
17	0,2817	0,22%
19	0,07653	0,06%
21	0,08037	0,06%
23	0,04149	0,03%
25	0,04243	0,03%
THDi		6,76%

IRMST = 125,286 A

IRMSH = 8,454 A

THDi% = 6,76

Conclui-se que as distorções harmônicas foram atenuadas, de modo que todos os valores atingiram os níveis desejados.

A Figura 13 traz os resultados das simulações feitas para a baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com os dados das correntes harmônicas e com os filtros para as 5^a, 7^a, 11^a e 13^a harmônicas instalados com um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade de 20. Na Tabela 12 seguem os valores dos módulos das correntes e suas respectivas distorções para cada frequência harmônica simulada na Figura 13.

Figura 13 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados, um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade igual a 20

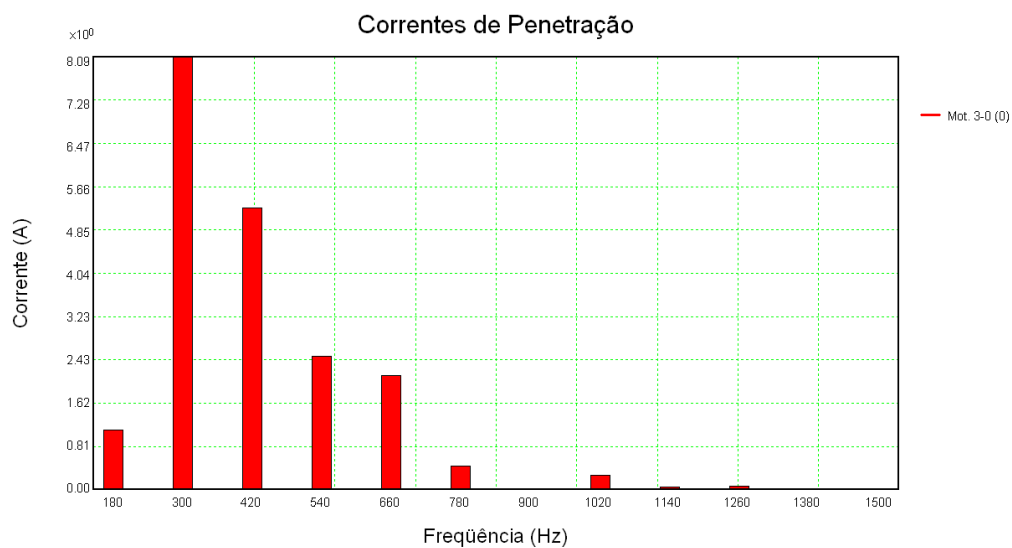


Tabela 12 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de qualidade igual a 20

Ordem	Corrente (A)	Distorção harmônica de corrente
1	125	100,00%
3	1,1295	0,90%
5	8,0855	6,46%
7	5,2794	4,22%
9	2,5121	2,00%
11	2,1524	1,72%
13	0,4690	0,37%
15	0,02969	0,02%
17	0,2822	0,22%
19	0,0766	0,06%
21	0,08041	0,06%
23	0,04150	0,03%
25	0,04244	0,03%
THDi		8,20%

IRMST = 125,422A

IRMSH = 10,285A

THDi% = 8,20

Na Tabela 13, são mostrados os resultados especificamente das correntes harmônicas que ultrapassavam os valores determinados nas normas, comprovando a eficiência na instalação dos filtros harmônicos. Todos os valores se mostraram satisfatórios. A harmônica 13ª já estava dentro dos padrões para a norma IEEE-519, apenas precisava se adequar à norma IEC 61000-3-4.

Tabela 13 – Valores das medições das harmônicas de corrente para Q=20

ORDEM HARMÔNICA	VALOR	IEC 61000-3-4	IEEE-519
7	4,22%	7,20%	12%
11	1,72%	3,1%	5,50%
13	0,37%	2%	-

A Figura 14 revela os resultados das simulações feitas para a baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com os dados das correntes harmônicas e com os filtros para as 5^a, 7^a, 11^a e 13^a harmônicas instalados com um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade de 50. Na Tabela 14 seguem os valores dos módulos das correntes e suas respectivas distorções para cada frequência harmônica simulada na Figura 14.

Figura 14 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados, um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade igual a 50

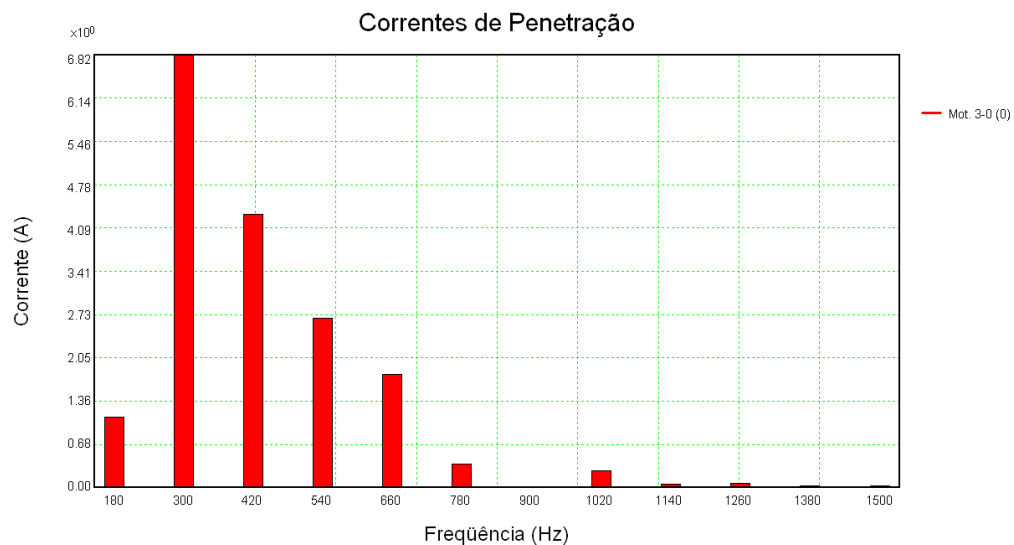


Tabela 14 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de qualidade igual a 50

Ordem	Corrente (A)	Distorção harmônica de corrente
1	125	100,00%
3	1,1297	0,90%
5	6,8295	5,45%
7	4,3279	3,45%
9	2,6877	2,15%
11	1,7955	1,43%
13	0,3956	0,31%
15	0,02955	0,02%
17	0,2818	0,22%
19	0,07655	0,06%
21	0,08037	0,06%
23	0,04149	0,03%
25	0,04243	0,03%
THDi		6,94%

IRMST = 125,309 A

IRMSH = 8,789 A

THDi% = 6,94

Na Tabela 15, são mostrados os resultados especificamente das correntes harmônicas que ultrapassavam os valores determinados nas normas, comprovando a eficiência na instalação dos filtros harmônicos. Todos os valores se mostraram satisfatórios. A harmônica 13ª já estava dentro dos padrões para a norma IEEE-519, apenas precisava se adequar à norma IEC 61000-3-4.

Tabela 15 – Valores das medições das harmônicas de corrente para Q=50

ORDEM HARMÔNICA	VALOR	IEC 61000-3-4	IEEE-519
7	0,90%	7,20%	12%
11	1,43%	3,1%	5,50%
13	0,31%	2%	-

A Figura 15 traz os resultados das simulações feitas para a baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com os dados das correntes harmônicas e com os filtros para as 5^a, 7^a, 11^a e 13^a harmônicas instalados com um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade de 80. Na Tabela 16 seguem os valores dos módulos das correntes e suas respectivas distorções para cada frequência harmônica simulada na Figura 15.

Figura 15 – Simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados, um fator de dessintonia de 3% e um fator de qualidade igual a 80

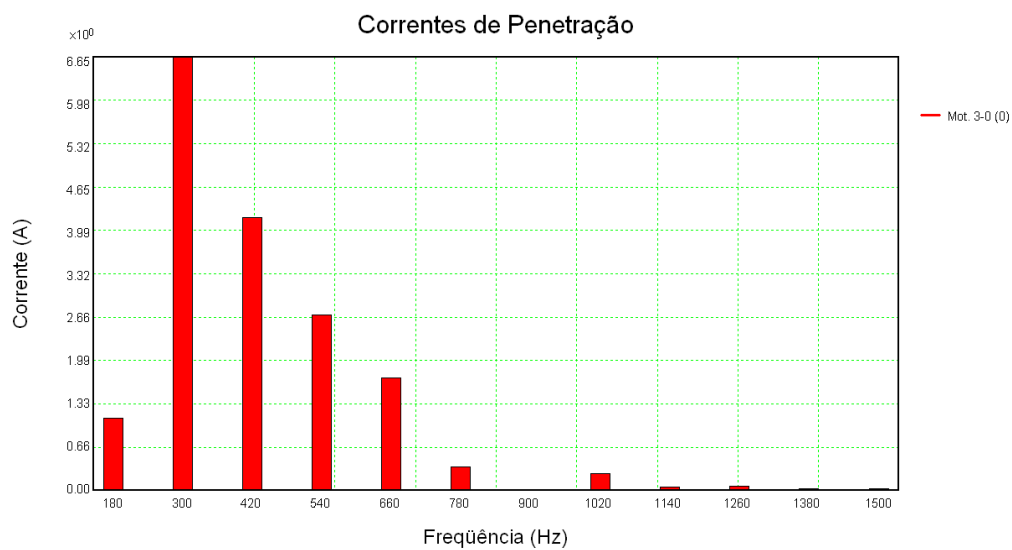


Tabela 16 – Valores da simulação das harmônicas de corrente realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados e um fator de qualidade igual a 80

Ordem	Corrente (A)	Distorção harmônica de corrente
1	125	100,00%
3	1,1297	0,90%
5	6,6462	5,32%
7	4,2014	3,36%
9	2,7111	2,16%
11	1,7468	1,39%
13	0,3854	0,30%
15	0,02953	0,02%
17	0,2817	0,22%
19	0,07654	0,06%
21	0,08037	0,06%
23	0,04149	0,03%
25	0,04243	0,03%
THDi		6,87%

IRMST = 125,295 A

IRMSH = 8,588 A

THDi% = 6,87

Na Tabela 17, são mostrados os resultados especificamente das correntes harmônicas que ultrapassavam os valores determinados nas normas, comprovando a eficiência na instalação dos filtros harmônicos. Todos os valores se mostraram satisfatórios. A harmônica 13ª já estava dentro dos padrões para a norma IEEE-519, apenas precisava se adequar à norma IEC 61000-3-4.

Tabela 17 – Valores das medições das harmônicas de corrente para Q=80

ORDEM HARMÔNICA	VALOR	IEC 61000-3-4	IEEE-519
7	3,36%	7,20%	12%
11	1,39%	3,1%	5,50%
13	0,30%	2%	-

A Figura 16 traz os valores das distorções harmônicas de tensão para o secundário do transformador antes da instalação dos filtros. Vale salientar que não há inconsistência com os valores determinados nas normas, sendo necessários apenas para a constatação de alguma possível irregularidade com a futura instalação dos filtros harmônicos de corrente. Devem sempre ser observadas as possibilidades de ressonância paralela. A Tabela 18 mostra os valores dos módulos das tensões com seus respectivos valores de frequência.

Figura 16 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados

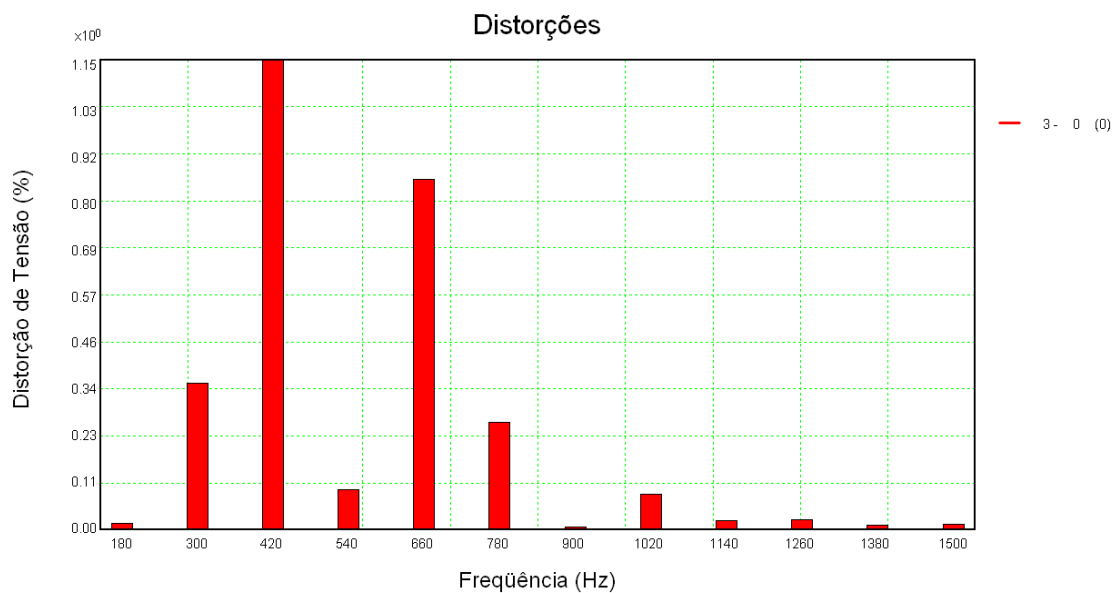


Tabela 18 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui sem a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados

Frequência (Hz)	Módulo (%)
180	0,01967
300	0,36070
420	1,14770
540	0,10030
660	0,85850
780	0,26430
900	0,00984
1020	0,08919
1140	0,02492
1260	0,02754
1380	0,01508
1500	0,01640

$$\text{THD}_v\% = 1,50812$$

A Figura 17 traz os valores das distorções harmônicas de tensão para o secundário do transformador após a instalação dos filtros para o valor de Q igual a 20. Vale salientar que em todas as frequências harmônicas houve uma diminuição das harmônicas, exceto para as frequências 3^a, 5^a e 9^a harmônica que apresentaram crescimento, não se encontrando nenhum tipo de irregularidade. A Tabela 19 mostra os valores dos módulos das tensões com seus respectivos valores de frequência.

Figura 17 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para um fator de qualidade igual a 20

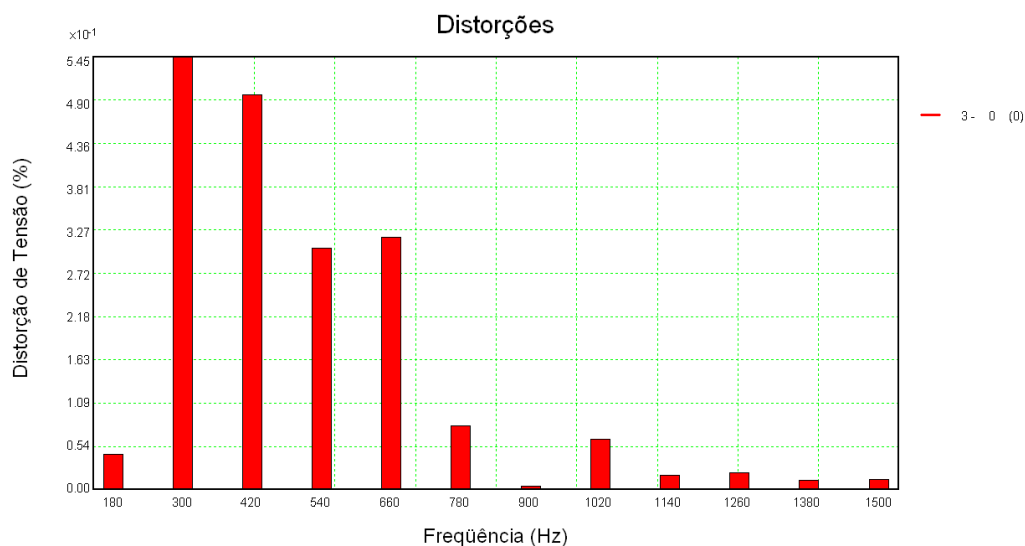


Tabela 19 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para Q=20

Frequência (Hz)	Distorção (%)
180	0,04568
300	0,5450
420	0,4982
540	0,3048
660	0,3192
780	0,08219
900	0,00600
1020	0,06467
1140	0,01962
1260	0,02276
1380	0,01287
1500	0,01430

$$\text{THD}_v\% = 0,86848$$

A Figura 18 demonstra os valores das distorções harmônicas de tensão para o secundário do transformador após a instalação dos filtros para o valor de Q igual a 50. Vale salientar que em todas as frequências harmônicas houve uma diminuição das harmônicas, exceto para as frequências 3^a, 5^a e 9^a harmônica que apresentaram crescimento, não se

encontrando nenhum tipo de irregularidade. A Tabela 20 mostra os valores dos módulos das tensões com seus respectivos valores de frequência.

Figura 18 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para um fator de qualidade igual a 50

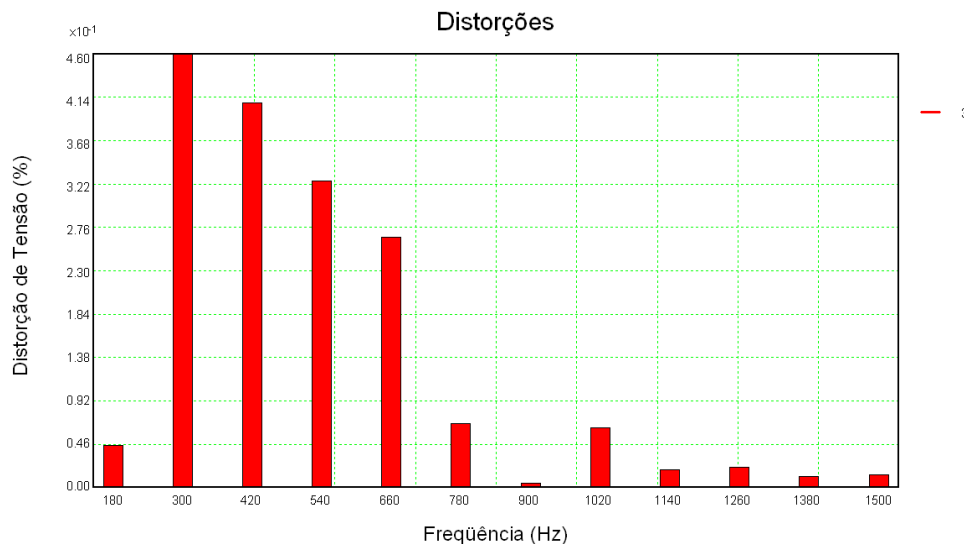


Tabela 20 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para Q=50

Frequência (Hz)	Distorção (%)
180	0,04569
300	0,4568
420	0,4084
540	0,3261
660	0,2662
780	0,06933
900	0,00598
1020	0,06457
1140	0,01961
1260	0,02275
1380	0,01286
1500	0,01430

$$\text{THD}_v\% = 0,75354$$

A Figura 19 traz os valores das distorções harmônicas de tensão para o secundário do transformador após a instalação dos filtros para o valor de Q igual a 80. Vale salientar que em todas as frequências harmônicas houve uma diminuição das harmônicas, exceto para as frequências 3ª, 5ª e 9ª harmônica que apresentaram crescimento, não se encontrando nenhum tipo de irregularidade. A Tabela 21 mostra os valores dos módulos das tensões com seus respectivos valores de frequência.

Figura 19 – Simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para um fator de qualidade igual a 80

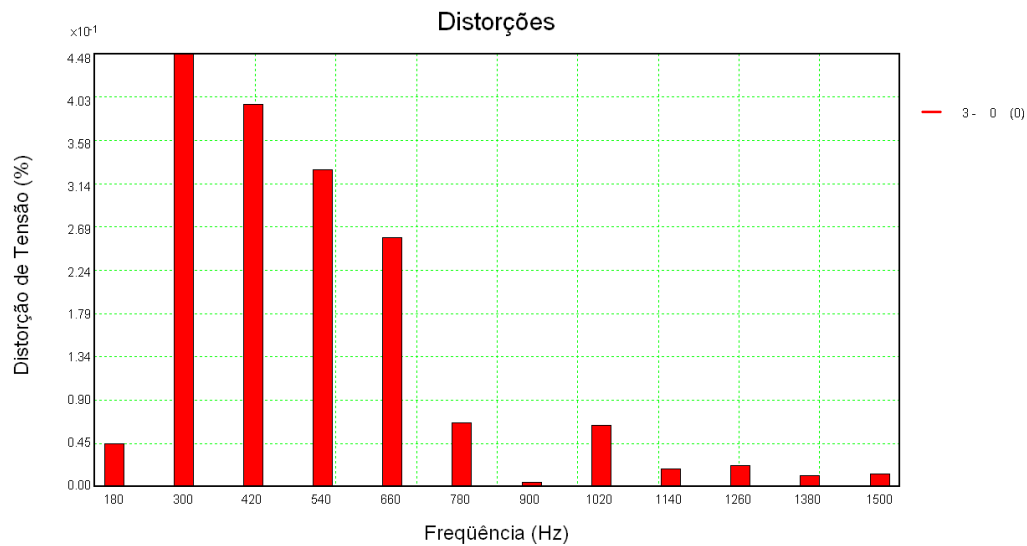


Tabela 21 – Valores da simulação das harmônicas de tensão realizada na baixa tensão do transformador da subestação do Jiqui com a presença dos filtros harmônicos passivos sintonizados para Q=80

Frequência (Hz)	Distorção (%)
180	0,04569
300	0,4480
420	0,3964
540	0,3289
660	0,2590
780	0,06754
900	0,00597
1020	0,06456
1140	0,01960
1260	0,02275
1380	0,01286
1500	0,01430

THD% = 0,73840

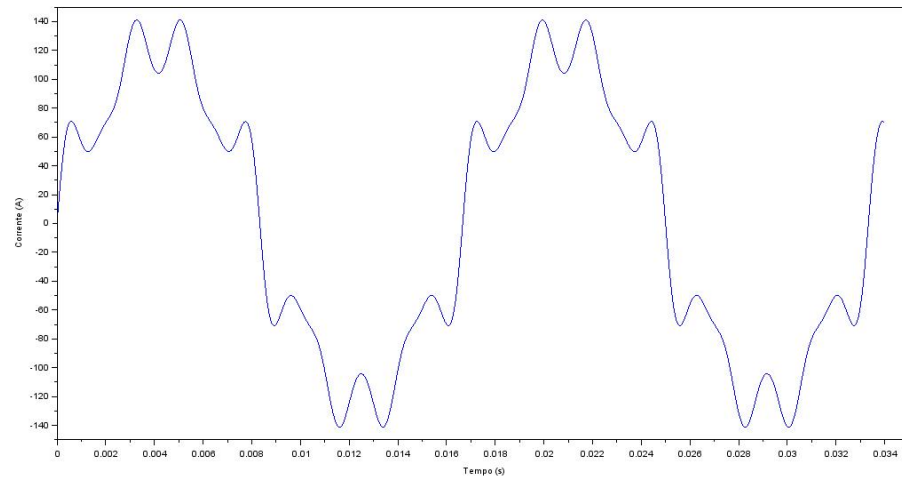
Uma das características do êxito na instalação dos filtros é a redução das harmônicas de tensão, que indica não ter havido de forma prejudicial o fenômeno da ressonância paralela, que significa alta amplificação de impedância harmônica para frequências que possuam correntes. Para ressonância paralela, no caso de haver uma corrente harmônica na instalação que coincida com a frequência de ressonância, haverá aumento dos níveis de tensão harmônicos.

A Tabela 22 mostra um quadro resumo dentre as 3 opções para o fator de qualidade e da situação inicial sem filtros para as distorções harmônicas de corrente para cada frequência ímpar.

Tabela 22 – Quadro comparativo das distorções harmônicas de corrente para o fator de qualidade igual a 20, 50 e 80 e a situação inicial sem filtro

Comparativo entre as distorções harmônicas de corrente									
Ordem	Q=20		Q=50		Q=80		Sem filtros		
	Corrente (A)	THDi	Corrente (A)	THDi	Corrente (A)	THDi	Corrente (A)	THDi	
1	125	100,00%	125	100,00%	125	100,00%	125	100,00%	
3	1,13	0,90%	1,1297	0,90%	1,1297	0,90%	0,973	0,78%	
5	8,08	6,46%	6,8295	5,45%	6,6462	5,32%	10,703	8,56%	
7	5,28	4,22%	4,3279	3,45%	4,2014	3,36%	24,325	19,46%	
9	2,51	2,00%	2,6877	2,15%	2,7111	2,16%	1,6541	1,32%	
11	2,15	1,72%	1,7955	1,43%	1,7468	1,39%	11,5787	9,26%	
13	0,47	0,37%	0,3956	0,31%	0,3854	0,30%	3,0163	2,41%	
15	0,03	0,02%	0,02955	0,02%	0,02953	0,02%	0,0973	0,08%	
17	0,28	0,22%	0,2818	0,22%	0,2817	0,22%	0,7784	0,62%	
19	0,08	0,06%	0,07655	0,06%	0,07654	0,06%	0,1946	0,16%	
21	0,08	0,06%	0,08037	0,06%	0,08037	0,06%	0,1946	0,16%	
23	0,04	0,03%	0,04149	0,03%	0,04149	0,03%	0,0973	0,08%	
25	0,04	0,03%	0,04243	0,03%	0,04243	0,03%	0,0973	0,08%	
THDi%	8,20%		6,94%		6,87%		23,38%		

Foram plotados os gráficos das correntes sem os filtros, bem como com os diferentes filtros projetados, por meio do programa SCILAB. A Figura 20, na sequência, traz a ilustração da corrente desconsiderando os filtros. No eixo das abscissas tem-se o tempo em segundos e no eixo das ordenadas a corrente em A.

Figura 20 – Corrente do sistema sem a instalação dos filtros

Para as situações nas quais os filtros foram instalados, pode-se perceber que o formato da onda se torna mais próximo de uma senóide e, em consequência, mais livre de ruídos. As figuras 21, 22 e 23 trazem os gráficos das correntes após a instalação dos filtros considerando os fatores de qualidade de 20, 50 e 80, respectivamente. Para cada um, no eixo das abscissas tem-se o tempo em segundos e no eixo das ordenadas a corrente em A.

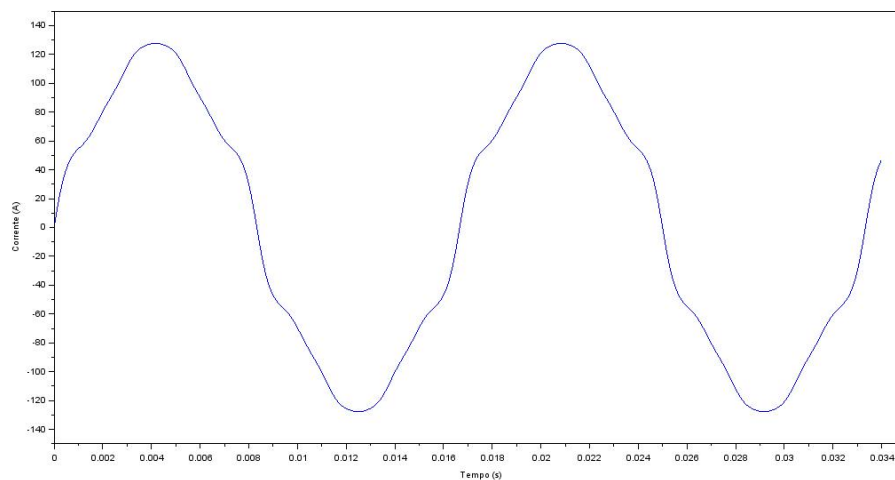
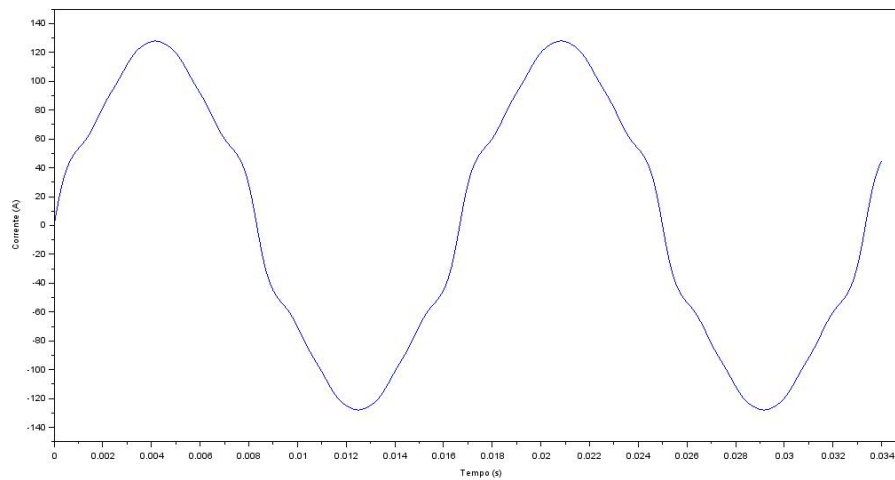
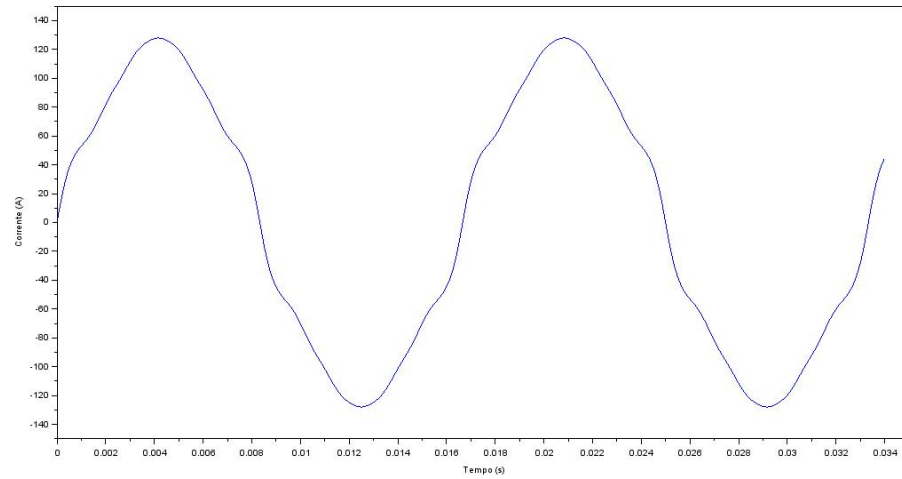
Figura 21 – Corrente do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 20**Figura 22 – Corrente do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 50**

Figura 23 – Corrente do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 80



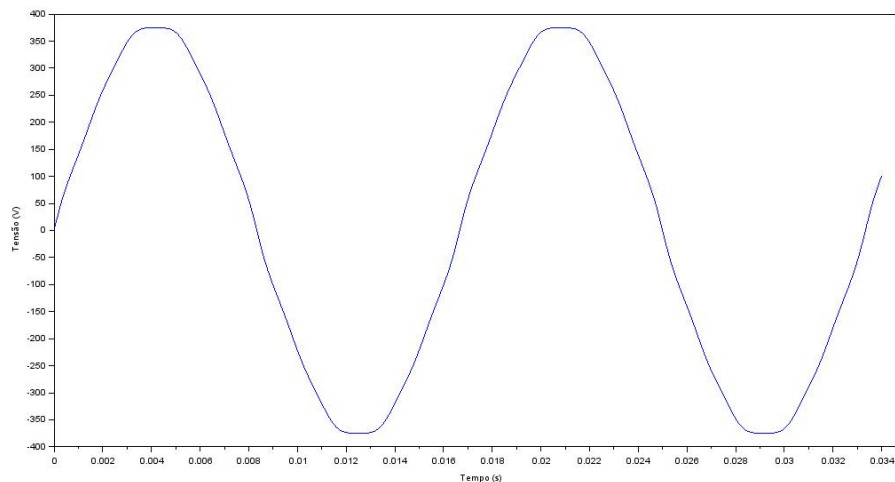
A Tabela 23 mostra um quadro resumo dentre as 3 opções para o fator de qualidade e da situação inicial sem filtros para as distorções harmônicas de tensão para cada frequência ímpar.

Tabela 23 – Quadro comparativo das distorções harmônicas de tensão para o fator de qualidade igual a 20, 50 e 80 e a situação inicial sem filtro

Comparativo entre as distorções harmônicas de tensão								
Ordem	Q=20		Q=50		Q=80		Sem filtros	
	Tensão (V)	THDv	Tensão (V)	THDv	Tensão (V)	THDv	Tensão (V)	THDv
1	380	100,00%	380	100,00%	380	100,00%	380	100,00%
3	0,173584	0,04%	0,173622	0,04%	0,173622	0,04%	0,074746	0,02%
5	2,071	0,54%	1,73584	0,45%	1,7024	0,44%	1,37066	0,36%
7	1,89316	0,49%	1,55192	0,40%	1,50632	0,39%	4,36126	1,15%
9	1,15824	0,30%	1,23918	0,32%	1,24982	0,32%	0,38114	0,10%
11	1,21296	0,32%	1,01156	0,26%	0,9842	0,26%	3,2623	0,86%
13	0,312322	0,08%	0,263454	0,06%	0,256652	0,06%	1,00434	0,26%
15	0,0228	0,00%	0,022724	0,00%	0,022686	0,00%	0,037392	0,01%
17	0,245746	0,06%	0,245366	0,06%	0,245328	0,06%	0,338922	0,09%
19	0,074556	0,02%	0,074518	0,02%	0,07448	0,02%	0,094696	0,02%
21	0,086488	0,02%	0,08645	0,02%	0,08645	0,02%	0,104652	0,03%
23	0,048906	0,01%	0,048868	0,01%	0,048868	0,01%	0,057304	0,02%
25	0,05434	0,01%	0,05434	0,01%	0,05434	0,01%	0,06232	0,02%
THDv%		0,86%		0,75%		0,73%		1,51%

O êxito com a instalação dos filtros passivos para as 3 opções estudadas é comprovado por meio da constatação da redução dos valores de distorção de tensão e corrente ao mesmo tempo.

Foram plotados os gráficos das tensões sem os filtros, bem como com os diferentes filtros projetados, por meio do programa SCILAB. A Figura 24, na seqüência, traz a ilustração da tensão desconsiderando os filtros. No eixo das abscissas tem-se o tempo em segundos e no eixo das ordenadas a tensão em V.

Figura 24 – Tensão do sistema sem a instalação dos filtros

Para as situações em que os filtros foram instalados, pode-se perceber sutilmente que o formato da onda se torna um pouco mais senoidal e um pouco mais livre de ruídos, pois as harmônicas de tensão já se encontravam com valores baixos. Nos valores das tensões mais próximos aos picos, após a instalação dos filtros, pode-se perceber essa diferença, tornando a senóide ainda mais próxima de um formato ideal com traços mais arredondados. As figuras 25, 26 e 27 trazem, respectivamente, os gráficos das tensões considerando os fatores de qualidade de 20, 50 e 80. Para cada um, no eixo das abscissas tem-se o tempo em segundos e no eixo das ordenadas a tensão em V.

Figura 25 – Tensão do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 20

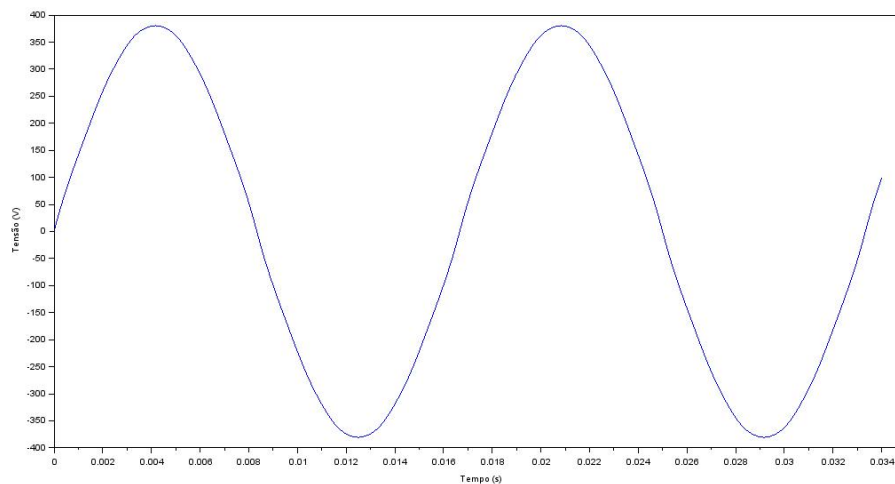


Figura 26 – Tensão do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 50

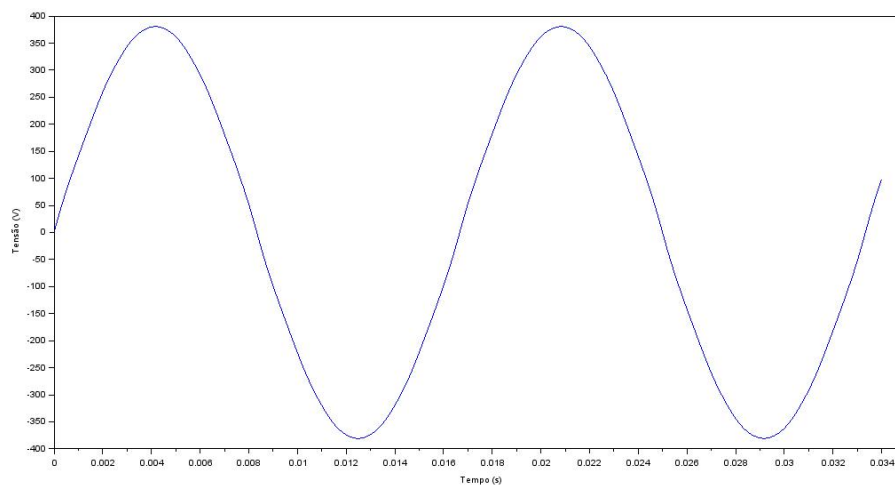
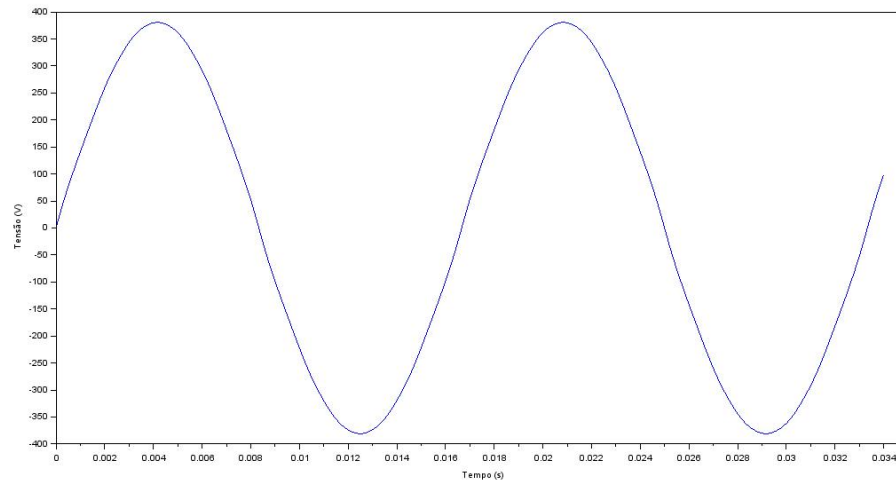


Figura 27 – Tensão do sistema com a instalação dos filtros e o fator de qualidade igual a 80



Fica notório perceber graficamente que as distorções de tensão também sofreram redução. Conseqüentemente, é fácil perceber que os gráficos das tensões com a instalação dos filtros se tornam menos distorcidos.

10. DESEMPENHO DOS FILTROS HARMÔNICOS NA FREQUÊNCIA

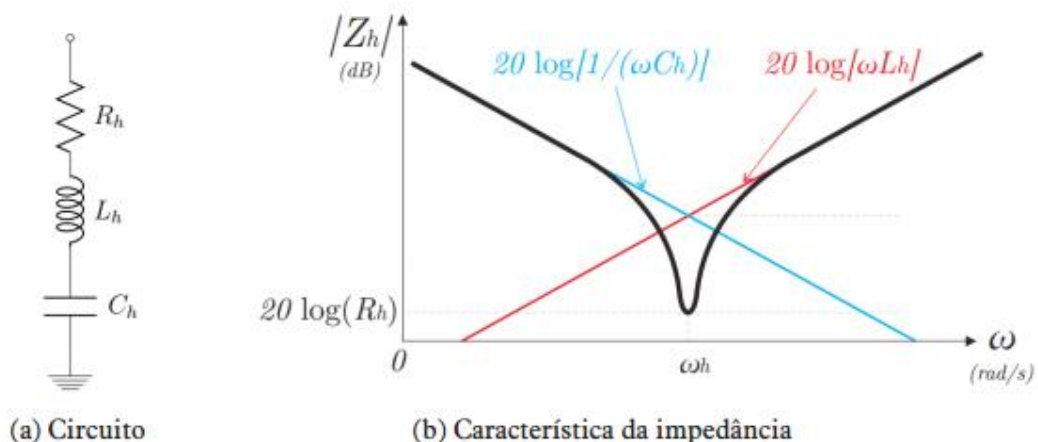
10.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os filtros que apresentam o modelo mais simples e que possuem o custo mais baixo são os filtros passivos construídos por meio de elementos RLC (Resistivo, Indutivo e Capacitivo) em série. Essa topologia, com a instalação junto ao circuito em paralelo, permite reduzir a impedância para as componentes harmônicas de corrente, provocando um caminho alternativo para essas correntes, impedindo suas passagens para o sistema. Esse circuito é ilustrado na Figura 28 (a).

Já a análise do comportamento da impedância do filtro pela frequência é dada na Figura 28 (b). A impedância é Z_h , a frequência angular ω e h é a ordem da harmônica.

Uma característica desse tipo de filtro é que, para uma frequência angular abaixo da frequência de ressonância, o filtro passa a ter uma característica capacitiva, ou seja, passa a ter característica complementar para uma possível correção do fator de potência da instalação. Quando a frequência angular for idêntica à frequência de ressonância, haverá a ressonância série. Considerando que nesse caso a impedância indutiva será, em módulo, igual à impedância capacitiva, a impedância do filtro resultante será composta apenas pela parcela real, ou seja, a resistência em série do circuito. Esse é o caso em que a impedância atinge o seu menor valor e a corrente que passa pelo filtro atinge seu valor máximo. Por outro lado, o filtro passará a ter característica indutiva quando a frequência angular for maior que a frequência ressonante.

Figura 28 – Circuito RLC série e característica da impedância

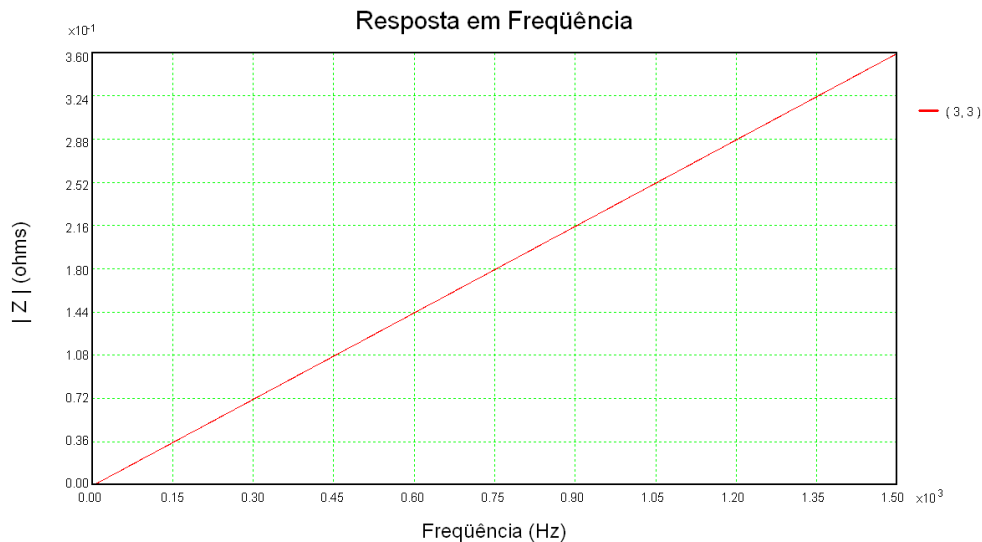


Fonte: adaptado de Phipps, J. K. (1997)

Nota-se que as curvas das reatâncias capacitiva $X_c=1/\omega c$ e indutiva $X_L=\omega L$ apresentam características opostas na frequência. Enquanto a reatância capacitiva se reduz com o crescimento da frequência, a reatância indutiva aumenta linearmente. O ponto de cruzamento é exatamente onde as reatâncias se anulam, a frequência de ressonância do filtro, onde a impedância é mínima para a harmônica desejada no projeto. Na frequência indicada é exatamente onde o circuito drenará a corrente harmônica que está sendo produzida nas cargas.

Posteriormente, na Figura 29, segue o gráfico da resposta em amplitude da impedância em frequência para o sistema sem a instalação dos filtros. Ressalta-se que o comportamento do circuito é linear por terem sido considerados apenas os elementos resistivos e indutivos. Assim, o sistema possui impedância crescente na frequência.

Figura 29 – Resposta em frequência da impedância do sistema sem a instalação dos filtros



Após a instalação dos filtros, a curva característica da impedância no circuito série, com o comportamento integrado do sistema com os filtros, é ilustrada na sequência na Figura 30, que revela o comportamento da impedância considerando um fator de qualidade igual a 20, visando à melhoria da eficiência do filtro. Constatou-se que os filtros operam para frequências ligeiramente abaixo da harmônica. As frequências centrais nas quais as impedâncias tendem a zero no projeto são aproximadamente 291 Hz, 407 Hz, 640 Hz e 756 Hz, que correspondem à 5ª harmônica (300 Hz), 7ª harmônica (420 Hz), 11ª harmônica (660 Hz) e 13ª harmônica (780 Hz), respectivamente.

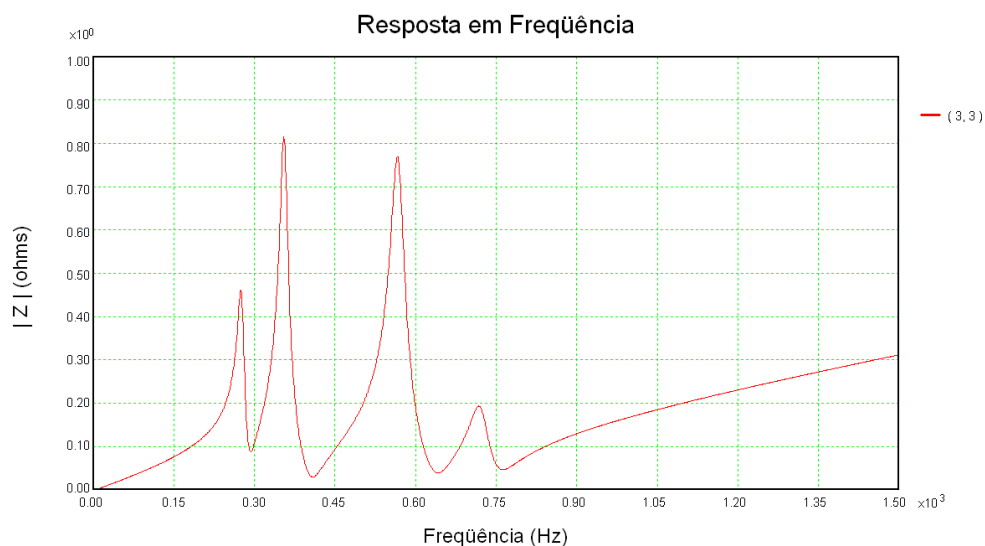
Com a consideração do fator de qualidade, implementa-se uma resistência ao circuito do filtro que promove a ampliação da largura da banda de passagem, auxiliando a atenuar também as harmônicas mais próximas.

Observa-se que existe uma amplificação nas harmônicas abaixo da frequência projetada para os filtros. Ressalta-se que esse comportamento é natural, entretanto deve-se

observar se os valores atingem níveis muito altos. Esse fato é comum em instalações onde são necessárias as correções de várias harmônicas, todavia, em determinados casos, faz-se necessária a utilização de vários filtros em conjunto, de modo a reduzir esse efeito.

No caso de existirem correntes harmônicas nas frequências de ressonância paralela, haverá um ganho de tensão, o que pode ser prejudicial. Como consequência, a ressonância paralela acarretará um crescimento na distorção harmônica de tensão.

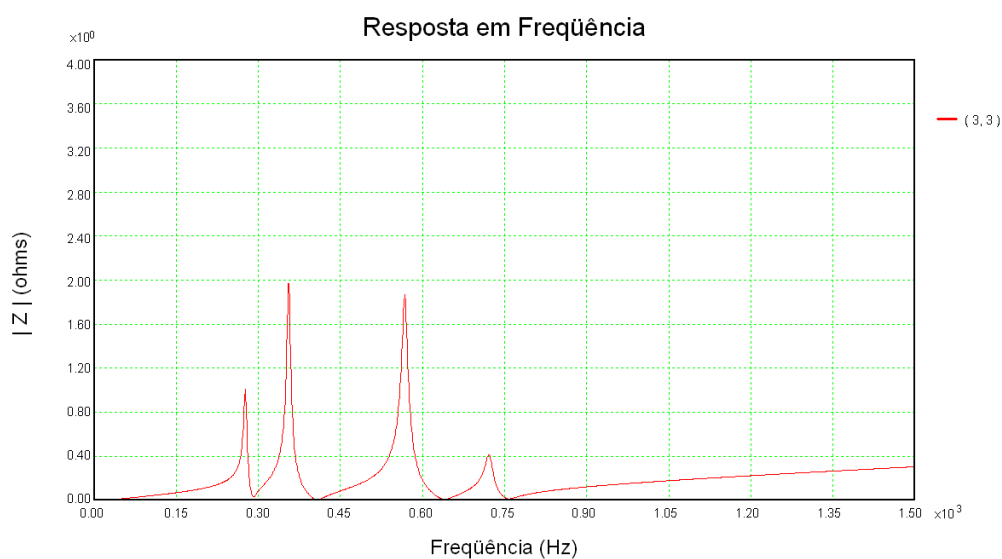
Figura 30 – Resposta em frequência da impedância do sistema com a instalação dos filtros, considerando a resistência R e o fator de qualidade igual a 20



Observa-se uma impedância máxima de cerca de 0,8 Ohms na frequência de 251 Hz, ou seja, existe um impacto baixo na ressonância paralela. Quanto à filtragem harmônica, para um fator de qualidade mais baixo é menos efetiva no que se refere à ressonância em série.

Na Figura 31, observa-se o comportamento da impedância do sistema com os filtros instalados para um fator de qualidade de 50.

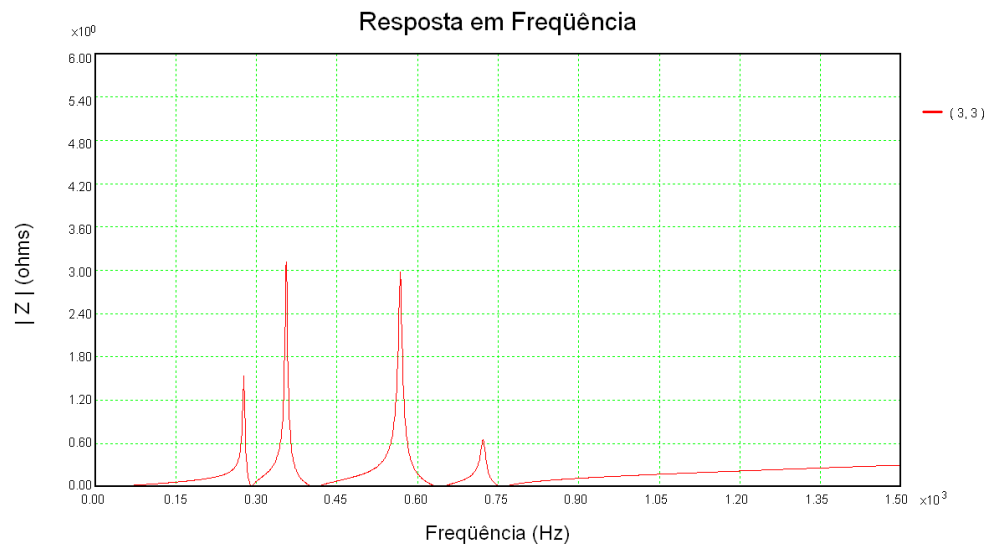
Figura 31 – Resposta em frequência da impedância do sistema com a instalação dos filtros, considerando a resistência R e o fator de qualidade igual a 50



Observa-se uma impedância máxima próxima a 2 Ohms na frequência de 251 Hz. Na prática, representa um comportamento natural e que não afeta a ressonância paralela, principalmente porque as correntes harmônicas para essa frequência são praticamente nulas.

Na Figura 32, observa-se o comportamento da impedância do sistema com os filtros instalados para um fator de qualidade de 80.

Figura 32 – Resposta em frequência da impedância do sistema com a instalação dos filtros, considerando a resistência R e o fator de qualidade igual a 80

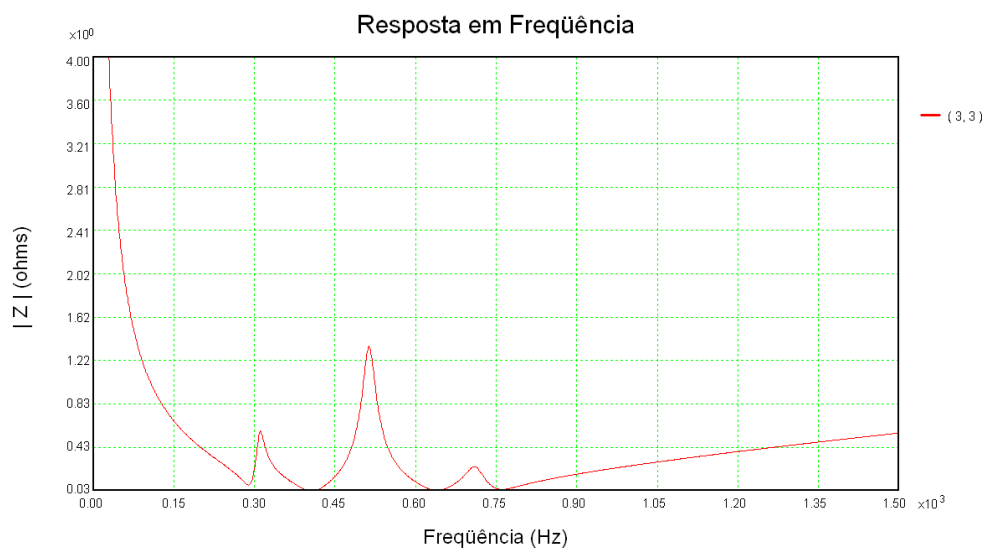


Observa-se uma impedância máxima pouco acima de 3 Ohms na frequência de 251 Hz. Conforme a avaliação feita para o fator de qualidade de 50, também não afeta de forma significativa a qualidade de energia elétrica. Não terá efeito sobre as distorções harmônicas de tensão nas frequências próximas, em razão também da não existência de correntes.

10.2. DESEMPENHO DAS IMPEDÂNCIAS DOS FILTROS CONSIDERANDO UM FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 20

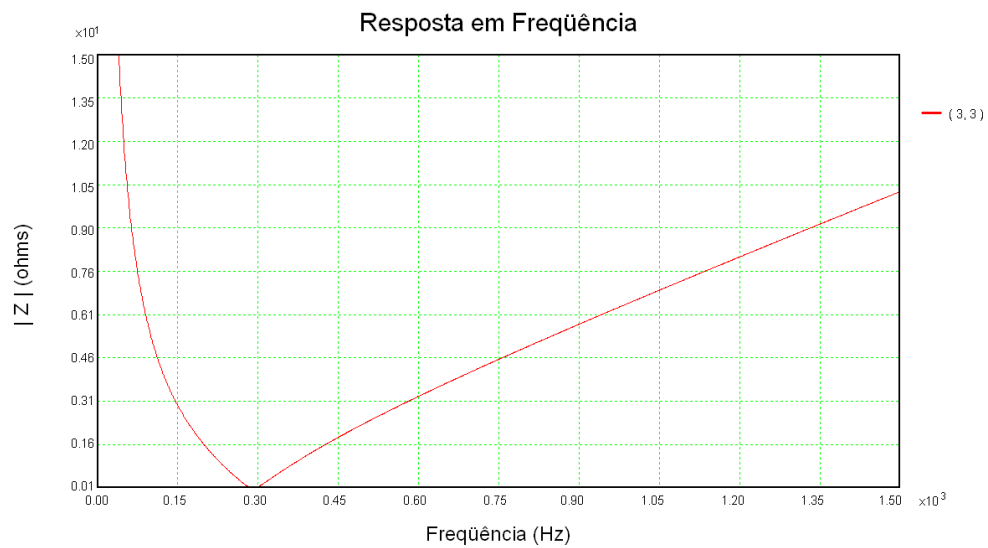
Foi feita a análise do comportamento de todos os filtros de forma integrada, de forma isolada do sistema. Na Figura 33 tem-se a ilustração do gráfico da resposta da impedância na frequência. Observa-se também que não há problemas com a ressonância paralela.

Figura 33 – Resposta em frequência da impedância dos filtros com o transformador desligado para o fator de qualidade igual a 20



É importante analisar também a resposta da impedância para cada filtro em sintonia. A representação da impedância do filtro da 5ª harmônica isoladamente é mostrada na Figura 34. Observa-se a não incidência de problemas de ressonância paralela e eficácia da ressonância série.

Figura 34 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 5ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20



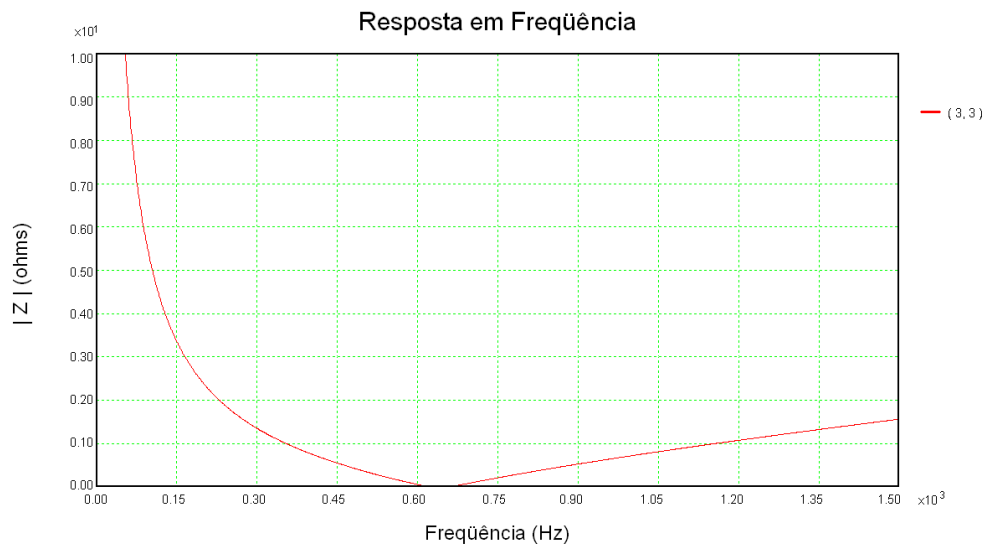
Na Figura 35 tem-se a representação da impedância do filtro da 7ª harmônica isoladamente. O comportamento gráfico está ideal.

Figura 35 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 7ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20



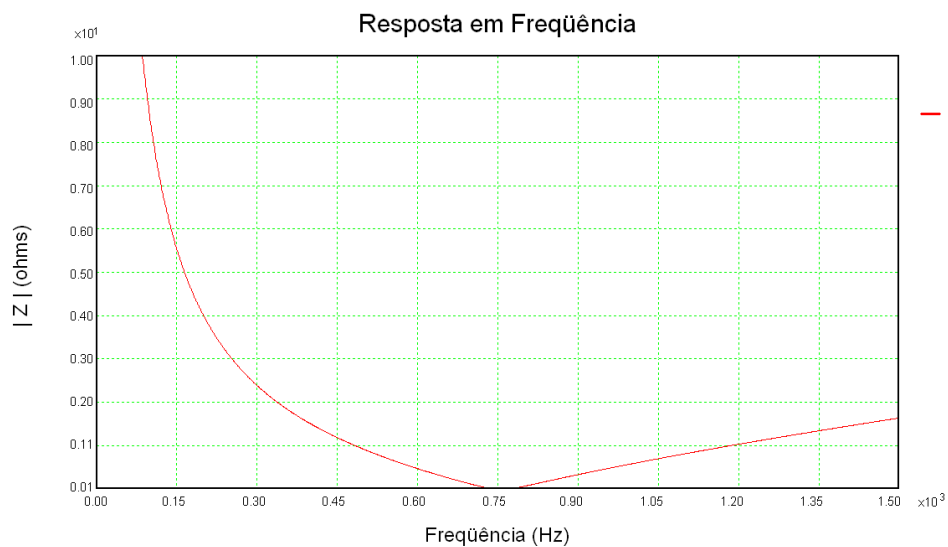
A representação da impedância do filtro da 11ª harmônica isoladamente é dada na Figura 36 e a resposta da impedância na frequência está conforme o projeto desenvolvido.

Figura 36 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 11ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20



Dando sequência, na Figura 37 tem-se a representação da impedância do filtro da 13ª harmônica isoladamente. A resposta do filtro é ideal.

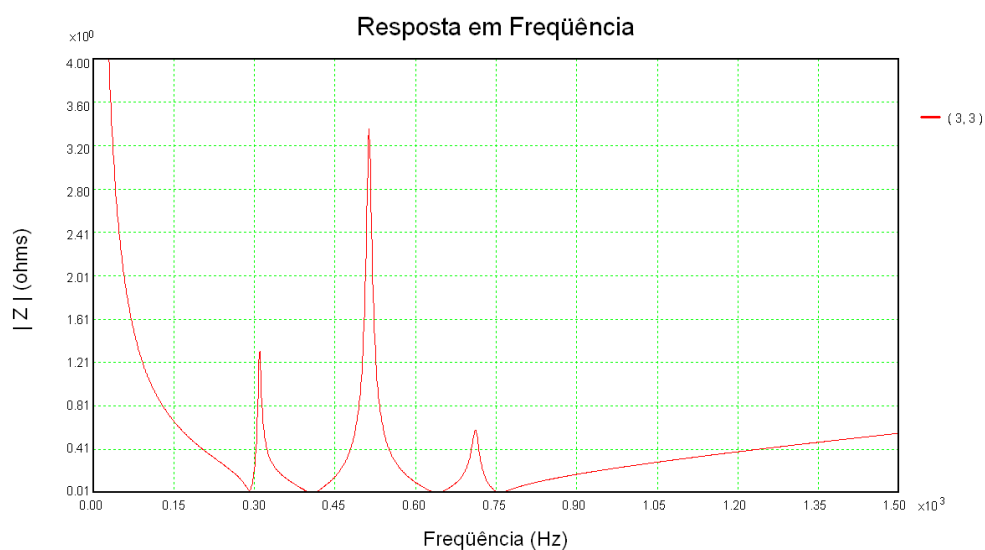
Figura 37 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 13ª harmônica para o fator de qualidade igual a 20



10.3. DESEMPENHO DAS IMPEDÂNCIAS DOS FILTROS CONSIDERANDO UM FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 50

Foi feita a análise do comportamento de todos os filtros de forma integrada, de forma isolada do sistema. Na Figura 38 tem-se a ilustração do gráfico da resposta da impedância na frequência. Observa-se também que não há problemas com a ressonância paralela.

Figura 38 – Resposta em frequência da impedância dos filtros com o transformador desligado para o fator de qualidade igual a 50



É importante analisar também a resposta da impedância para cada filtro em sintonia. A representação da impedância do filtro da 5^a harmônica isoladamente é mostrada na Figura 39. Observa-se a não incidência de problemas de ressonância paralela e eficácia da ressonância série.

Figura 39 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 5ª harmônica para o fator de qualidade igual a 50



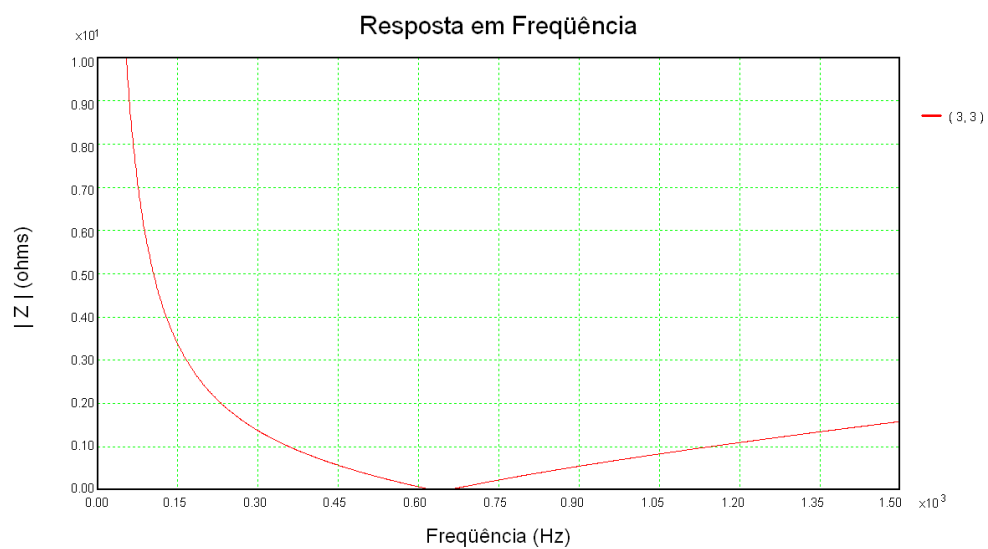
Na Figura 40 tem-se a representação da impedância do filtro da 7ª harmônica isoladamente. O comportamento gráfico está ideal.

Figura 40 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 7ª harmônica para o fator de qualidade igual a 50



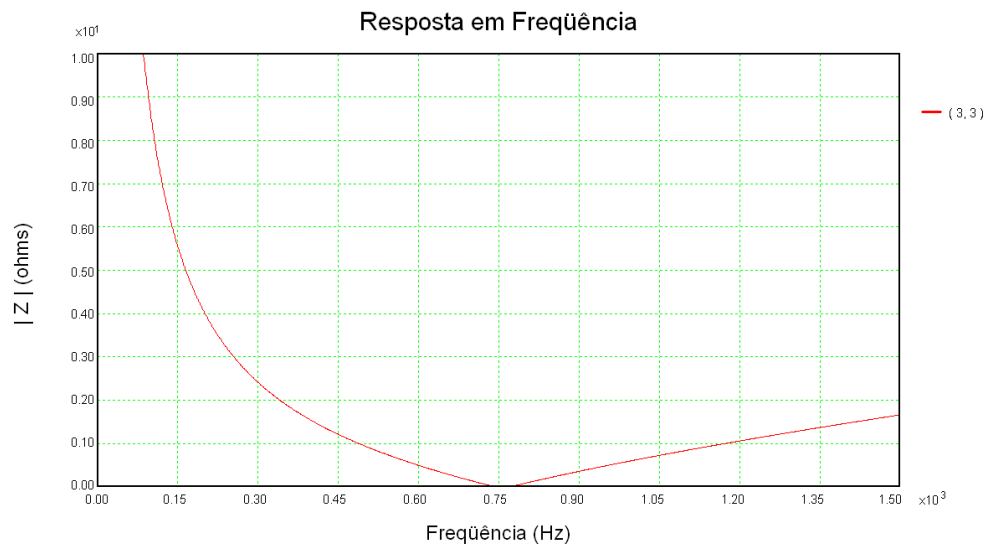
A representação da impedância do filtro da 11ª harmônica isoladamente é dada na Figura 41 e a resposta da impedância na frequência está conforme o projeto desenvolvido.

Figura 41 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 11^a harmônica para o fator de qualidade igual a 50



Na Figura 42 tem-se a representação da impedância do filtro da 13^a harmônica isoladamente. A resposta do filtro é ideal.

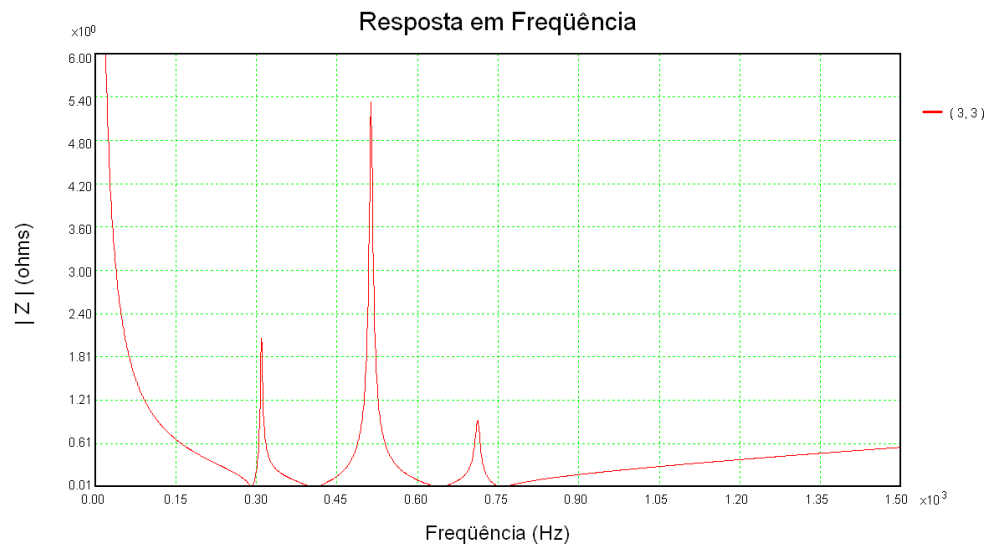
Figura 42 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 13ª harmônica para o fator de qualidade igual a 50



10.4. DESEMPENHO DAS IMPEDÂNCIAS DOS FILTROS CONSIDERANDO UM FATOR DE QUALIDADE IGUAL A 80

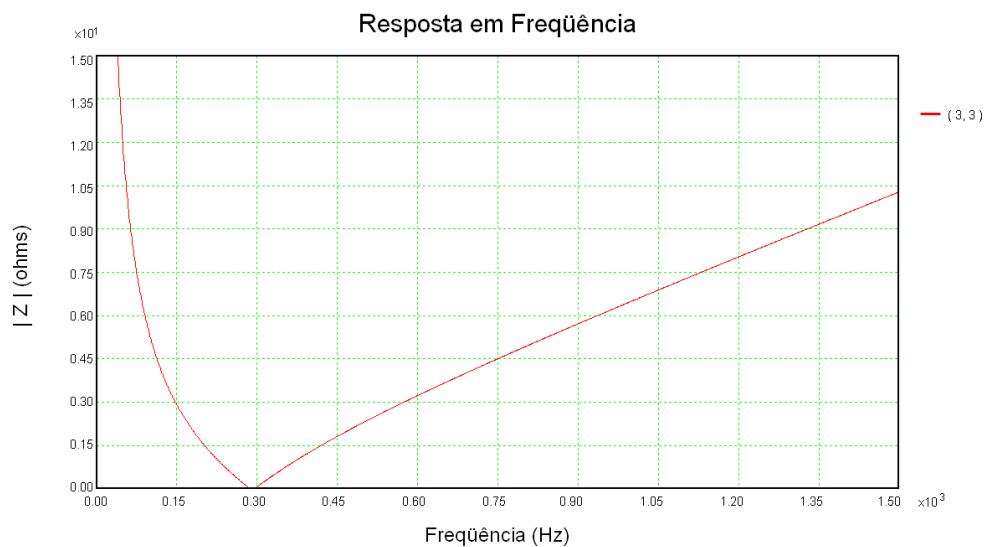
Foi feita a análise do comportamento de todos os filtros de forma integrada, de forma isolada do sistema. Na Figura 43 tem-se a ilustração do gráfico da resposta da impedância na frequência. Observa-se também que não há problemas com a ressonância paralela.

Figura 43 – Resposta em frequência da impedância dos filtros com o transformador desligado para o fator de qualidade igual a 80



É importante analisar também a resposta da impedância para cada filtro em sintonia. A representação da impedância do filtro da 5ª harmônica isoladamente é mostrada na Figura 44. Observa-se a não incidência de problemas de ressonância paralela e eficácia da ressonância série.

Figura 44 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 5ª harmônica para o fator de qualidade igual a 80



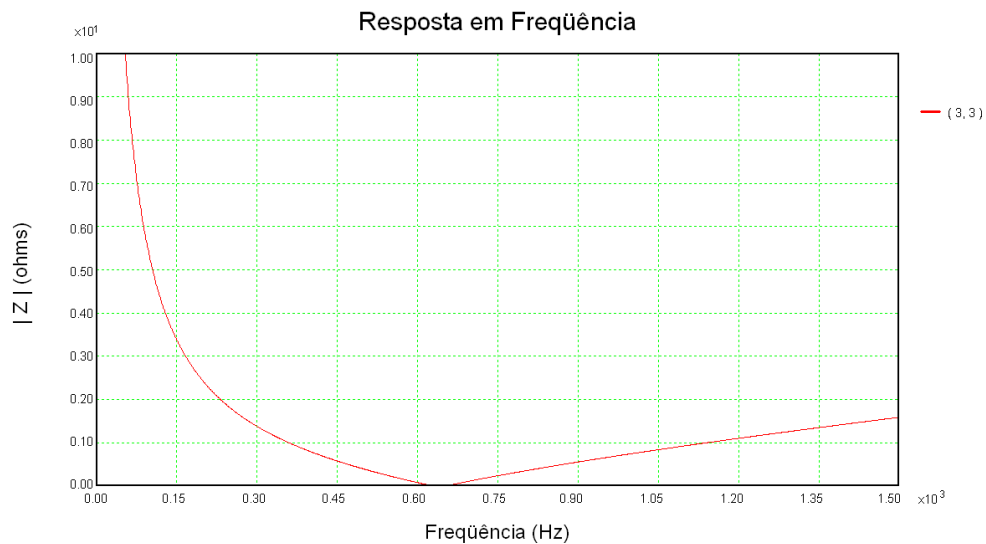
Na Figura 45 tem-se a representação da impedância do filtro da 7ª harmônica isoladamente. O comportamento gráfico está ideal.

Figura 45 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 7ª harmônica para o fator de qualidade igual a 80



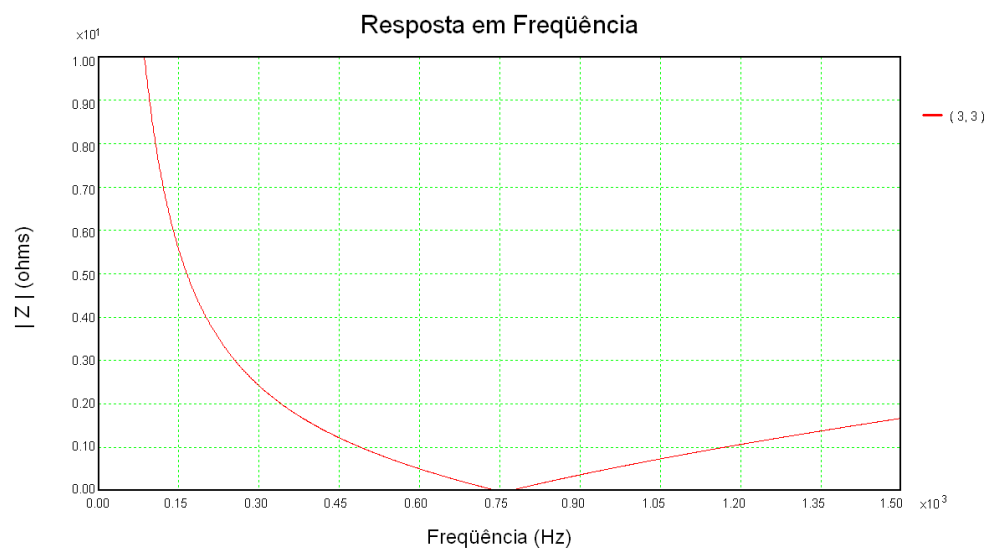
A representação da impedância do filtro da 11ª harmônica isoladamente é dada na Figura 46 e a resposta da impedância na frequência está conforme o projeto desenvolvido.

Figura 46 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 11ª harmônica para o fator de qualidade igual a 80



Dando sequência, na Figura 47 tem-se a representação da impedância do filtro da 13ª harmônica isoladamente. A resposta do filtro é ideal.

Figura 47 – Resposta em frequência da impedância do filtro de 13ª harmônica para o fator de qualidade igual a 80



Observa-se que para cada filtro harmônico sintonizado existe a sintonia para uma frequência abaixo e próxima da frequência harmônica original, sendo melhor observado nos gráficos individualizados para cada filtro.

As simulações para todos os filtros (5ª, 7ª, 11ª e 13ª harmônicas) para os fatores de qualidade iguais a 20, 50 e 80 obtiveram êxito, sendo assim, todos os filtros apresentam resposta satisfatória para o problema apresentado.

11. MEMORIAL DESCRITIVO

11.1. GENERALIDADES

Este memorial descritivo tem como objetivo melhor especificar serviços e materiais dos filtros harmônicos passivos a serem aplicados nas instalações elétricas a serem executadas na subestação elétrica do Jiqui.

Todas as referências feitas nos projetos e neste memorial têm como única finalidade especificar padrão, tipo, qualidade ou acabamento dos produtos industrializados a serem adotados.

11.2. LOCALIZAÇÃO

A Estação Elevatória de Água do Jiqui é localizada na Av. Ayrton Senna, sem número, Nova Parnamirim - Parnamirim-RN, conforme mapa da Figura 48 na sequência.

Figura 48 - Mapa de localização da Estação Elevatória de Água do Jiqui



11.3. ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS E COMPONENTES UTILIZADOS NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Condutores:

- Os condutores deverão ser de cobre eletrolítico;
- Deverão obedecer aos seguintes dimensionamentos por cada frequência:
 - 5ª harmônica: #10 mm²;
 - 7ª harmônica: #16 mm²;
 - 11ª harmônica: #10 mm²;
 - 13ª harmônica: #16 mm².

- Os cabos alimentadores dos filtros passivos para as harmônicas 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, da Pirelli, deverão ser Ficap ou Imbrac, ou similar, nas cores convencionadas neste memorial;
- Os cabos referentes aos diversos circuitos deverão obedecer ao seguinte código de cores:
Conductor Fase: vermelho;
Conductor Neutro: azul;
Conductor Terra: verde.
- Os condutores do projeto devem ser isolados em PVC com classe de isolamento 750 V e flexíveis (classe de encordoamento 5);
- Os cabos de aterramento devem ser nus, semi-rígidos;
- Os cabos deverão ser singelos;
- Não será permitida a instalação de condutores expostos (sem proteção de eletrodutos), exceto para o cabo de aterramento;
- As emendas deverão obrigatoriamente localizar-se nos condutes e nas caixas de passagem, a fim de garantir segurança nas instalações;
- Isolamentos de emendas e conexões de condutores serão executados por meio de fitas isolantes normatizadas;
- Não será permitido o lançamento de condutores fora de eletroduto, fixados às estruturas ou soltos acima de forros;
- Os cabos não deverão ser propagadores de chama.

Eletrodutos:

- Os eletrodutos serão embutidos em alvenaria;
- Deverão ser em PVC rígido, classe A, soldáveis, de fabricação Tigre, Amanco ou similar, em conformidade com a NBR 6150;
- Não serão aceitos eletrodutos flexíveis, corrugados ou mangueiras, exceto os eletrodutos flexíveis com alma de aço (*Seal Tubo*) para ser usado no trecho de subida para interligação ao painel elétrico;
- Nas extremidades dos eletrodutos no interior de quadros e caixas terminais, serão aplicadas buchas e arruelas de PVC;
- Não se deve, em hipótese alguma, misturar condutores de energia elétrica a outros condutores.

Capacitores:

- Devem ser protegidos internamente através de dispositivo de interrupção por sobrepressão e com tecnologia de autorregeneração;
- O capacitor deve ser totalmente encapsulado;
- Sua construção deve ser propícia para a troca de calor, recomendável construção em alumínio;
- O dimensionamento da potência trifásica deve obedecer aos valores estabelecidos no projeto;

- No regime permanente devem atender as seguintes especificações:
 - Limite de 110% da tensão V_r ;
 - A tensão de pico não pode exceder $1,2 \cdot V_r \cdot \sqrt{2}$
 - Limite de 135% da corrente *rms*;
 - Operação para 60 Hz;
 - Máximo de 135% da potência.
- É necessária a impregnação com resina vegetal, biodegradável.

Reatores:

- Devem ser construídos a seco;
- Os núcleos são feitos de chapa de aço silício;
- É necessário ter espaços no núcleo;
- As bobinas do reator devem ser formadas por fios magnéticos;
- É muito importante que o reator esteja firmemente construído, de modo a evitar vibrações;
- Material isolante Classe H (180° C);
- Elevação de temperatura Classe F (105° C);
- Instalação abrigada IP-00;
- Capacidade de sobrecarga de 300% da corrente nominal por 1 minuto;
- As ferragens devem ser bicromatizadas;
- Devem estar aptos para operar na frequência fundamental;
- Devem possuir valores de impedância de acordo com o projeto;

- Devem suportar os limites de corrente e tensão do filtro em regime permanente.

Resistores:

- Devem obedecer aos valores dimensionados no projeto;
- Devem ser do tipo: resistores de fio;
- Devem ser fixos e em suporte metálico;
- Devem ser formados internamente por uma bobina de fio com alto poder resistivo;
- São envolvidos por uma base cerâmica, de modo a suportarem maiores variações nas temperaturas, aumentando a capacidade de isolamento térmico;
- A base deve ser composta por carbono em pó fino com material cerâmico;
- Devem suportar os limites de corrente e tensão do filtro;
- Devem estar aptos para operar na frequência fundamental.

Disjuntores:

Os disjuntores deverão possuir:

- Dispositivo de operação manual com abertura mecanicamente livre para operações de abertura e fechamento;
- Dispositivo de disparo intercambiável, eletromecânico, de ação direta por sobrecorrente com elementos instantâneos temporizados;
- Dispositivo de disparo de ação direta e elemento térmico para proteção contra sobrecargas prolongadas;

- Deverão possuir capacidade de tensão em conformidade com o filtro;
- Devem estar aptos para operar na frequência fundamental;
- Capacidade de interrupção de 3 kA;
- Deverão obedecer aos seguintes dimensionamentos por cada frequência:
 - 5ª harmônica: 40 A;
 - 7ª harmônica: 63 A;
 - 11ª harmônica: 40 A;
 - 13ª harmônica: 50 A.
- Os disjuntores deverão ser de fabricação SIEMENS, PIAL, ou similar equivalente.

Conectores:

- Os conectores devem obedecer ao dimensionamento dos cabos;
- Para interligação nos componentes do quadro de comando e no transformador devem ser do tipo olhal;
- Para interligação nos componentes do quadro de comando e no transformador devem ser de compressão;
- Devem ser instalados por meio de alicate de compressão;
- Devem possuir baixa resistência elétrica e alta resistência mecânica;
- Devem possuir capacidade térmica de 90° C no mínimo;
- Para a conexão com o sistema de aterramento, deve ser usado o conector tipo grampo “U”.

Hastes de aterramento:

- As hastes de aterramento devem ser *copperweld* 5/8"x2,4 m com conector integrado;
- As hastes serão instaladas em caixas de inspeção de 30x30x40cm;
- Haverá interligação das hastes de aterramento principal com o aterramento do quadro de comando;
- As hastes serão interligadas com o condutor PE e este levado à barra de terra da subestação de 2x300 kVA.

Contatores:

- Devem possuir retardo na partida;
- Devem ser instalados para permitir o chaveamento dos filtros;
- Sua capacidade de corrente por frequência harmônica deve ser:
 - 5ª harmônica: 40 A;
 - 7ª harmônica: 63 A;
 - 11ª harmônica: 40 A;
 - 13ª harmônica: 50 A.

Acessórios:

No quadro de instalação dos filtros devem ter:

- Voltímetro com escala de 0-500 V, 72 x 72 mm;
- Painel elétrico com 1,5 m de altura, 30 cm de largura e 30 cm de profundidade.
- Chave comutadora para voltímetro;
- 3 Amperímetros, 72x72 mm;
- 3 Transformadores de corrente;
- 1 Botão liga na cor verde, 30mm, corpo em zamak e aro frontal em alumínio anodizado, para serviço pesado, com bloco de contatos e porta etiqueta com identificação;
- 1 Botão desliga na cor vermelha, 30mm, corpo em zamak e aro frontal em alumínio anodizado, para serviço pesado, com bloco de contatos e porta etiqueta com identificação;
- 1 Sinaleira verde (filtro desligado), 30mm, corpo em zamak e aro frontal em alumínio anodizado, para serviço pesado, sinalizador com leds de alto brilho, 220V, com bloco de contatos e porta etiqueta com identificação;
- 1 Sinaleira vermelha (filtro ligado), 30mm, corpo em zamak e aro frontal em alumínio anodizado, para serviço pesado, sinalizador com leds de alto brilho, 220V, com bloco de contatos e porta etiqueta com identificação;
- 1 Botão de emergência com trava e bloqueio por chave yale, 30mm, corpo em zamak e aro frontal em alumínio anodizado, para serviço pesado, com bloco de contatos 1 Normalmente Aberto e 1 Normalmente Fechado e porta etiqueta com identificação;
- Proteção contra sobrecorrente, subcorrente, falta de fase, proteção térmica, sobretensão e subtensão;

- Acessórios como: cabos, calhas, parafusos bicromatizados, arruelas lisas e de pressão, terminais de compressão, box reto de alumínio;
- Os equipamentos, tais como: disjuntores, contadores, cabos, deverão possuir Certificado de Qualidade ISO 9000;
- As partes energizadas do painel deverão ser protegidas através de material PETG transparentes, conforme NR-10;

11.4. INSTALAÇÃO

A instalação deve ser feita no cubículo de transformação da subestação abrigada de 2x300 kVA da Estação do Jiqui que se encontra vazio, sem a utilização do antigo transformador de serviços de 45 kVA.

11.5. INTERLIGAÇÃO DE ENERGIA

A interligação será feita mediante conexão no quadro de distribuição principal que é interligado aos transformadores da subestação em estudo. A conexão será por meio de terminais tipo olhal, tendo em vista a melhor praticidade e fixação ao se interligar ao barramento. Os filtros deverão ficar instalados em quadro de comando isolado, cuja interligação se dará por meio de eletrodutos flexíveis com alma de aço.

11.6. ATERRAMENTO

Os filtros passivos serão interligados ao sistema de aterramento da subestação já existente. O cabo de aterramento deverá ser interligado a uma haste de aço cobreado tipo *copperweld*, com 2,4m de comprimento e 5/8" de diâmetro, enterrada no solo e que possua extremidade superior à vista em caixas de passagem, onde serão feitas as conexões. O condutor que interligará as hastes e o barramento de terra será semi-rígido e nu. A resistência do sistema de aterramento não deverá ser superior a 10 ohms.

O condutor PE deverá ser tão curto e retilíneo quanto possível, sem emendas e protegido através de eletroduto de PVC com diâmetro de 3/4" e com profundidade mínima de 1 metro. A conexão da haste com o condutor de terra é feita através do conector tipo grampo "U" (cabo haste) e, por garantia adicional, deverá ser feita também solda exotérmica.

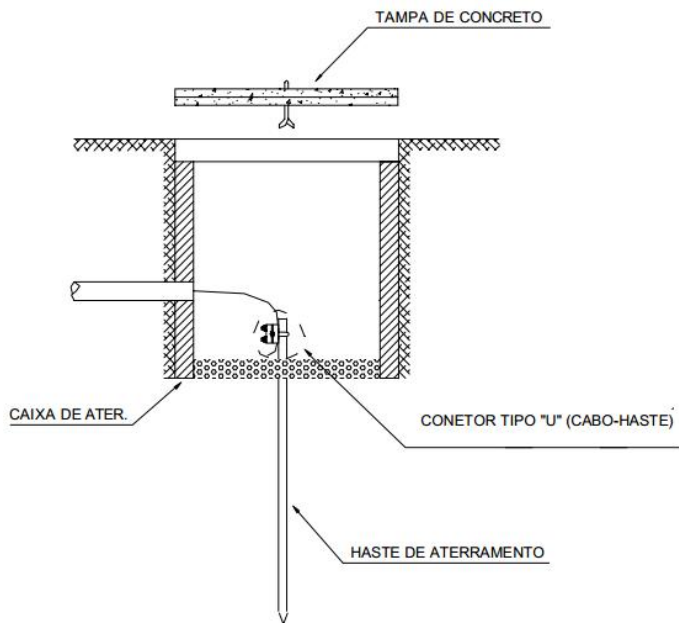
As caixas de inspeção deverão estar a uma profundidade mínima de 50 centímetros do solo. As entradas dos eletrodutos nas caixas de inspeção deverão ser no meio da caixa.

O condutor de aterramento será ligado ao barramento de aterramento do quadro de distribuição terminal e deve possuir mesmo dimensionamento dos cabos dos filtros.

O cabo de aterramento deverá atender à norma NBR 5410.

A Figura 49 na sequência ilustra a conexão do condutor de aterramento ao circuito.

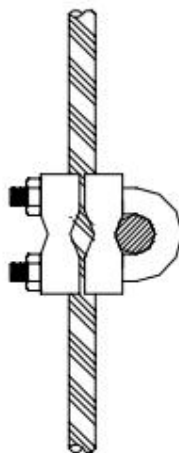
Figura 49 - Vista da interligação ao sistema de aterramento



Fonte: Adaptado da Norma “Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição a edificações individuais” da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE, 5ª Edição.

A Figura 50 traz a ilustração do conector utilizado para fixar a haste de aterramento com o condutor de cobre.

Figura 50 – Conector tipo “U” (cabo-haste)



CONETOR TIPO "U" (CABO-HASTE)

Fonte: Adaptado da Norma “Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição a edificações individuais” da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE, 5ª Edição.

11.7. LEGISLAÇÃO BÁSICA

- NBR 5410 – Instalações elétricas em baixa tensão;
- NBR 6150 – Eletroduto de PVC rígido;
- NBR 6148 – Fios e cabos com isolação sólida estruturada de cloreto de polivinila para tensões de até 750 V sem cobertura;
- Norma “Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição a edificações individuais” da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE, 5ª Edição.

12. CONCLUSÕES

Atualmente, a presença de harmônicas nas indústrias está cada vez mais comum nas indústrias e um dos principais motivos é a crescente utilização das chaves inversoras de frequência. A situação da CAERN não é diferente e os acionamentos utilizando inversores têm contribuído muito para alterações na qualidade de energia elétrica de forma significativa.

O trabalho trouxe as informações das grandezas elétricas em campo, com a identificação das distorções harmônicas de corrente e tensão. Foi feita então a modelagem do sistema, incluindo os dados das linhas, as especificações das cargas e os detalhes dos equipamentos na rede. Foi desenvolvido o projeto de filtros passivos sintonizados de modo a corrigir as necessidades encontradas.

O projeto proposto resultou na redução das harmônicas de corrente para os níveis desejados para todas as três possibilidades de escolha de fator de qualidade. Os filtros passivos especificados são apropriados para sistemas nos quais a carga não varia expressivamente, adequado para o sistema da Estação Elevatória de Água Bruta da CAERN, por ter seu funcionamento baseado em vazão contínua, o que permite que as grandezas elétricas relacionadas não oscilem significativamente.

Salienta-se que ainda não existe uma norma brasileira que trate dos limites de distorção harmônica, entretanto já existe um procedimento da Agência Nacional de Energia Elétrica, o PRODIST – Módulo nº 8 – Qualidade de Energia, que trata dos limites de distorção harmônica de tensão. Dessa forma, são adotadas as normas da IEC e IEEE internacionais de modo a garantir uma boa correção na qualidade de energia elétrica, já que tratam das distorções harmônicas de corrente.

As simulações feitas no programa HARMZS comprovaram que as instalações dos filtros obtiveram êxito, corrigindo as harmônicas de corrente e melhorando por consequência as distorções de tensão do sistema. As impedâncias dos filtros foram projetadas para as

frequências pouco abaixo das frequências harmônicas e as simulações retrataram a realidade. Observou-se também o comportamento adequado da impedância do sistema após a interligação dos filtros. O êxito se deu não apenas pela redução das harmônicas de corrente, mas também por não ter havido nenhuma amplificação de harmônica em níveis indesejados. Isso pôde ser aferido também com as simulações das tensões do sistema.

Acrescenta-se ainda que o modelo estudado foi capaz de reproduzir as condições reais verificadas em operação na estação de bombeamento da CAERN, tornando possível a verificação do comportamento do filtro passivo sintonizado que ficou proposto neste projeto.

Conclui-se, portanto, que os filtros passivos são eficazes para a solução dos problemas encontrados, ressaltando que caso o sistema venha a sofrer mudanças, é preciso que haja novo projeto para redimensionamento dos filtros.

Recomenda-se, portanto, a escolha pelo filtro passivo paralelo em sintonia única com fator de qualidade igual a 80, por possuir uma largura de banda de passagem adequada para a situação exposta, cujas variações nas cargas são mínimas, por ter apresentado melhor eficiência nas reduções das distorções harmônicas de tensão e corrente, além de ter perdas menores devido ao efeito Joule.

12.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

À medida que o trabalho foi se desenvolvendo, observou-se que para a mesma solução proposta existiam outras topologias capazes de solucionar o mesmo problema. Foi constatado também que em uma hipótese de alteração das cargas, seja por desgaste de partes mecânicas ou hidráulicas do sistema ou por acréscimo de cargas, os filtros passivos especificados necessitariam de uma readaptação. É importante ressaltar, todavia, que essa possibilidade é considerada remota, motivo pelo qual se deu a escolha dos filtros passivos.

Caso mudanças no sistema sejam efetuadas, tais quais as mencionadas acima, outra possibilidade de correção das harmônicas de corrente teria de ser considerada. A aplicação de filtros ativos ou híbridos poderia ser abordada.

Para propor uma evolução do estudo atual, seria importante um levantamento sobre as questões econômicas da instalação de cada filtro e uma análise comparativa entre as principais vantagens adicionais para cada modelo.

Uma das possíveis continuidades deste trabalho seria uma expansão do projeto para filtros específicos para as cargas da ETA, da EEAB, do Laboratório de Química e do Prédio Administrativo.

Com o crescimento cada vez mais intenso do uso de equipamentos eletrônicos, em residências, que contribuem de maneira crescente com as distorções harmônicas, uma ampliação do estudo visando as correções nas redes de distribuição de baixa tensão também pode enriquecer a pesquisa. A análise da redução das perdas por efeito Joule e os efeitos nos cabos alimentadores também pode ser abordado. É interessante incrementar o trabalho quantificando o ganho operacional obtido e também fazer uma relação com os investimentos despendidos.

O projeto foi testado por meio de simulações utilizando os programas HARMZS e SCILAB, porém existe a possibilidade de agregar algoritmos utilizando outras plataformas distintas.

REFERÊNCIAS

[1] ALVES, M. S. M., “Dimensionamento básico de filtros eletromagnéticos de sequência positiva e negativa”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2013.

[2] ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Brasília, 2012.

[3] BORTOLUZZI, A. P., “Uma contribuição ao estudo de filtros passivos sintonizados em sistemas elétricos industriais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Regional de Blumenau, 2012.

[4] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Eletrica. Manual de utilização do Programa HARMZS, 2009, Versão 1.9, p. 202.

[5] PENG, F. Z.; AKAGI, H.; NABAE, A.; “Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 1, 1993.

[6] FASSBINDER, S., Guia de Aplicação de Qualidade de Energia. Disponível em: <<http://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2009/06/331-harmonicas-filtros.pdf>>. Data de acesso: 14 de dezembro de 2014.

[7] IEC, About the IEC, Global reach. Disponível em: <<http://www.iec.ch/>>. Data de acesso: 13 de dezembro de 2014.

[8] IEEE, Organização. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/organizacao/>>. Data de acesso: 13 de dezembro de 2014.

[9] IEEE, Sobre o IEEE. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/sb-unb/sobreieee/sobre-o-ieee/>>. Data de acesso: 27 de março de 2015.

[10] IEEE 1036, Guide for Application of Shunt Power Capacitors. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1036-1992.html>>. Data de acesso: 16 de abril de 2015.

[11] IEEE 1531, Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1531-2003.html>>. Data de acesso: 28 de março de 2015.

[12] LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. Harmônicos em Sitemas Elétricos. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 354 p.

[13] LOWENSTEIN, M; HIBBARD, J., Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits. Disponível em: <<http://ecmweb.com/power-quality/meeting-ieee-519-1992-harmonic-limits>>. Data de acesso: 13 de dezembro de 2014.

[14] MOUCO, A. C., “Um filtro híbrido de potência para conexão em redes elétricas de alta tensão sem transformadores”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

[15] NASCIMENTO, R. P., “Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e suportabilidade”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

[16] Norma “Fornecimento de energia elétrica em tensão secundária de distribuição a edificações individuais” da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE, 5ª Edição.

[17] PHIPPS, J. K. A transfer function approach to harmonic filter design. IEEE Industry Applications Magazine, p. 68-82, mar./abr. 1997.

[18] POMILIO, J. A., IEC. Disponível em:<
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/IEC.pdf>>. Data de acesso: 13 de dezembro de 2014.

[19] POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M., Distorção harmônica: causas, efeitos e soluções. Disponível em:<
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a4.pdf>>. Data de acesso: 13 de dezembro de 2014.

[20] PORRAS, C. A. R.; NARANJO, M.A.; GALLEGO R.A. Análisis de Armónicos em Sistemas Eléctricos, Grupo de Investigación em Planeamiento de Sistemas Eléctricos Universidad Tecnológica de Pereira, 2003.

[21] RIBEIRO, F. C., “Influência dos harmônicos na qualidade de energia elétrica”, Monografia de graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

[22] SANTOS, F. M. F., “Qualidade de energia – comparação das normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519”, Monografia de graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

[23] SCHNEIDER ELECTRIC, IEEE Standard 519 applicability to adjustable frequency controllers. Disponível em:< <http://static.schneider-electric.us/docs/Motor%20Control/AC%20Drives/C-883.pdf>>. Data de acesso 13 de dezembro de 2014.

[24] SEEMA, P. D.; INAMDAR, H. P.; VAIDYA, A. P.; “Simulation Studies of Shunt Passive Harmonic Filters: Six Pulse Rectifier Load Power Factor Improvement and Harmonic Control”, ACEEE International Journal on. Electrical and Power Engineering, Vol. 2, No. 1, 2011.

[25] SILVA, M. M. D., “Análise de filtros passivos de harmônicos de conversor CA/CC de seis pulsos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

[26] TEIXEIRA, D. A., “Análise de distorções harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

[27] HSIA, Y. T., “Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems”, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 193-199, 2001.

APÊNDICE A: CÓDIGO UTILIZADO NO PROGRAMA HARMZS

Foi elaborado um código para implementar a interligação dos filtros passivos no sistema. Todos os elementos foram calculados no projeto. O código utilizado nas simulações foi realizado no programa HARMZS da CEPEL, editado por meio do editor EDIT CEPEL.

Os dados gerais do sistema são dados por DGERAIS.

DGERAIS

%

FREQUENCIA 60.000000

SBASE 100.000000

DADOS Unidades

INTERFACE Unidades

METODOLOGIA YS

TITULO ESTACAO DO JIQUI

IDBARRA NUMERO

%

FIM

A função DEQP remete às instalações dos filtros e a função DSCR remete às injeções harmônicas do sistema.

Foram consideradas as três opções para o fator de qualidade (Q).

% Filtro para Q=20

DEQP

3	0	1	1	0.10402733428200	0.4289786980680	262.875208009	s
3	0	2	1	0.03199843632830	0.0942516533972	610.436238136	s
3	0	3	1	0.04222164402160	0.0791408510246	294.400998389	s
3	0	4	1	0.05761849883650	0.0913854065609	182.541582799	s

FIM

%Filtro para Q=50

DEQP

3	0	1	1	0.04161093371280	0.4289786980680	262.875208009	s
3	0	2	1	0.01279937453130	0.0942516533972	610.436238136	s
3	0	3	1	0.01688865760860	0.0791408510246	294.400998389	s
3	0	4	1	0.02304739953460	0.0913854065609	182.541582799	s

FIM

% Filtro para Q=80

DEQP

3	0	1	1	0.02600683357050	0.4289786980680	262.875208009	s
3	0	2	1	0.00799960908208	0.0942516533972	610.436238136	s
3	0	3	1	0.01055541100540	0.0791408510246	294.400998389	s
3	0	4	1	0.01440462470910	0.0913854065609	182.541582799	s

FIM

A função DSRC introduz os valores das harmônicas no barramento da baixa tensão do sistema.

DSRC

3	I	1	1
180.00	1.00	0.00	
300.00	11.0	0.00	
420.00	25.0	0.00	
540.00	1.70	0.00	
660.00	11.9	0.00	
780.00	3.10	0.00	
900.00	0.10	0.00	
1020.00	0.80	0.00	
1140.00	0.20	0.00	
1260.00	0.20	0.00	
1380.00	0.10	0.00	
1500.00	0.10	0.00	

FIMP

FIM

ANEXO B: DADOS DA REDE ELÉTRICA FORNECIDOS PELA CONCESSIONÁRIA LOCAL

1. Referente ao ponto de entrega, PG F2523 / JQI-01S5

1.a Níveis de curtos circuitos e impedância equivalente Thevénin e níveis de curtos circuitos, PG F2523:

- Impedância equivalente Thevénin:

$$Z1 = 0,3875 + j 1,3371 \text{ pu};$$

$$Z0 = 0,6178 + j 2,8316 \text{ pu};$$

Sbase: 100 MVA; Vbase: 13,8 kV.

- Valores de curtos circuitos:

$$\text{Trifásico} = 3000,36 \text{ A};$$

$$\text{Fase-Fase} = 2602,72 \text{ A};$$

$$\text{Fase-Terra} = 2210,02 \text{ A}$$

$$\text{Fase-Terra Mínimo} = 194,17 \text{ A}.$$

1.b Ajustes do relé associado ao disjuntor JQI-21S5:

RTC 600/5

Relé PL-300 / EH-3244

Fase:

Unidade 51: Tap 2 A Curva 0,45 MI IEC

Unidade 50: Tap 8 A Tempo: 0,07 s

Neutro:

Unidade 51N: Tap 0,25 A Curva 0,12 NI IEC

Unidade 50N: Tap 2 A Tempo: 0,07 s

Neutro Sensível:

Unidade 51Ns: Tap 0.1 A Tempo: 5 s

Outras funções:

Fase Aberta = 0.30 I2/I1 Tempo 5.0 s

Sobrecorrente Instantâneo de Fase - High1 = 42.0 A - Tempo 0.07 s

Sobrecorrente Instantâneo de Neutro - High1 = 42.0 A - Tempo 0.07 s

Religamentos Automáticos:

Número de religamentos: 2

Tempos dos religamentos: 1.5 / 15 s

Seqüência de operações: (50/51/50N/51N) / (51/51N) / (51/51N)

Funções que bloqueiam o religamento: 51NS / FASE ABERTA / 50HF / 50HN

Tempo de Reset: 60 s

Fonte: Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN)