

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LARISSA SCHLING SANDER

**ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS
PARA REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO COM MEDIDAS
REALIZADAS NO LADO DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO DO
IFSC CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LARISSA SCHLING SANDER

**ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS
PARA REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO COM MEDIDAS
REALIZADAS NO LADO DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO DO
IFSC CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro(a) Eletricista.

Orientadora:
Prof. Lisandra Kittel Ries, Dra. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Sander, Larissa

**ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS
PARA REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO COM MEDIDAS REALIZADAS
NO LADO DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO DO IFSC CÂMPUS
FLORIANÓPOLIS / Larissa Sander; orientação de
Lisandra Kittel Ries. - Florianópolis, SC, 2025.**

144 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico
de Eletrônica.**

Inclui Referências.

**1. Distorções Harmônicas. 2. Filtros Passivos. 3.
Qualidade de Energia. I. Kittel Ries, Lisandra. II. Instituto
Federal de Santa Catarina. III. ESTUDO COMPARATIVO
NA UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA REDUÇÃO
DE CONTEÚDO HARMÔNICO COM MEDIDAS REALIZADAS NO LADO
DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO DO IFSC CÂMPUS FLORIANÓPOLIS.**

ESTUDO COMPARATIVO NA UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO COM MEDIDAS REALIZADAS NO LADO DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO DO IFSC CÂMPUS FLORIANÓPOLIS

LARISSA SCHLING SANDER

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso de graduação em engenharia elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 20 de março, 2025.

Banca Examinadora:

Profa. Lisandra Kittel Ries, Dra.

Profa. Maria Cláudia de Almeida Castro, Dra.

Prof. Fábio Victor Schreiber, Me.

Prof. Juliano Bittencourt Padilha, Dr.

Dedico este trabalho à minha família por toda força e apoio em todos estes anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Silvana e Robenir, por estarem sempre ao meu lado, sendo exemplos de força, dedicação e amor. Mãe, admiro profundamente a sua coragem e resiliência, que me ensinaram a nunca desistir dos meus sonhos. Pai, você é o meu maior exemplo de profissional da Engenharia, e foi ao te observar que aprendi o verdadeiro significado de comprometimento e excelência. Obrigada por acreditarem em mim, por me incentivarem a prestar vestibular para Engenharia, mesmo quando eu duvidava da minha própria capacidade, e por me proporcionarem todas as condições para que eu pudesse me dedicar ao curso. Sem vocês, essa conquista não teria sido possível.

Aos meus avós, Solange e Alcenio, que me criaram como uma segunda filha e sempre reforçaram a importância dos estudos. Mesmo quando a distância estava entre nós, o carinho, o apoio e os ensinamentos de vocês nunca deixaram de me acompanhar. A presença de vocês, ainda que longe, foi essencial ao longo dessa caminhada.

Ao meu namorado, Zorândio, pelo apoio incondicional, pela paciência nos momentos difíceis e pelo carinho que tornou essa jornada mais leve. Sua presença ao meu lado foi um refúgio nos dias mais desafiadores e uma força silenciosa que me impulsionou a seguir em frente.

À minha grande amiga, Julia, o maior presente que a Engenharia me deu. Obrigada por toda a parceria, amizade e por compartilhar comigo cada desafio e conquista, tanto no curso quanto na vida.

À minha orientadora, Lisandra, por toda a dedicação, disponibilidade e paciência ao longo deste trabalho. Seu brilho no olhar e paixão por ensinar são inspiradores, e sou muito grata por todo o seu apoio.

Aos amigos e colegas de curso, por cada desafio enfrentado juntos, pelas trocas de aprendizado e pelo companheirismo ao longo dessa jornada.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo que busca avaliar a redução das componentes harmônicas no lado de baixa tensão da subestação do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) - Câmpus Florianópolis com a utilização de filtros passivos. A motivação central está relacionada aos efeitos adversos das harmônicas em sistemas elétricos e equipamentos. Considerando as normas e recomendações pertinentes ao tema, foram avaliados procedimentos de projeto adequados. Os dados coletados na subestação foram analisados e utilizados em simulações para modelar a planta elétrica, permitindo a avaliação da eficácia dos filtros. Além disso, o estudo compara os dados de energia coletados em 2023 com os de 2018, assim como as propostas de redução das distorções harmônicas na instalação.

Palavras-chave: Distorções harmônicas. Filtros passivos. Qualidade de energia.

ABSTRACT

This study presents an evaluation of the reduction of harmonic components on the low voltage side of the substation at the Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) - Câmpus Florianópolis, using passive filters. The main motivation is related to the adverse effects of harmonics on electrical systems and equipment. Considering the relevant standards and recommendations on the subject, suitable design procedures were assessed. Data collected from the substation were analyzed and used in simulations to model the electrical plant, allowing the evaluation of the effectiveness of the filters. Furthermore, the study compares energy data collected in 2023 with that of 2018, as well as the proposed solutions for reducing harmonic distortions in the installation.

Keywords: Harmonic distortions. Passive filters. Power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo médio por lasse dos anos de 2018 a 2023	27
Figura 2 – Distorção de corrente causado por resistor não-linear	29
Figura 3 – Representação da série de Fourier de uma forma de onda distorcida.....	30
Figura 4 – Conexão e circuito típico de filtro <i>shunt</i>	42
Figura 5 – Estrutura do filtro 3C1L	43
Figura 6 – Filtro de bloqueio LC paralelo de fase em um sistema trifásico equilibrado	44
Figura 7 – Filtro <i>shunt</i> amortecido.....	44
Figura 8 – Diagrama unifilar simplificado da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis.....	46
Figura 9 – Equipamento utilizado para realização das medições.....	47
Figura 10 – Características da Instalação Fornecidas pela Concessionária	48
Figura 11 – Modelo por fontes de corrente	51
Figura 12 – Corrente e tensão vistas pelo alimentador nas fases R, S e T de cada QGBT	68
Figura 13 – Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019	69
Figura 14 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs	70
Figura 15 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.	71
Figura 16 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT....	73
Figura 17 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT, baseado nos dados obtidos em 2018	74
Figura 18 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores obtidas via simulação da planta equilibrada.....	76
Figura 19 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores, baseado nos dados obtidos em 2018	77
Figura 20 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores obtidos via simulação da planta equilibrada	78
Figura 21 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019	79
Figura 22 – Corrente e tensão dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros	85

Figura 23 – Comparativo entre os valores de THDi dos respectivos QGBTs antes e depois da inserção dos filtros.....	86
Figura 24 – Amplitudes das componentes harmônicas de corrente com filtros <i>shunt</i>	87
Figura 25 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros	89
Figura 26 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores obtidas via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros	90
Figura 27 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros	91
Figura 28 – Corrente e tensão vistas pelo alimentador nas fases R, S e T de cada QGBT obtidos via simulação da planta desequilibrada.....	102
Figura 29 – Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019, para a planta desequilibrada.....	103
Figura 30 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, para planta desequilibrada.....	104
Figura 31 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	104
Figura 32 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT para a planta desequilibrada.....	107
Figura 33 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019, para a planta desequilibrada.....	107
Figura 34 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores para a planta desequilibrada.....	110
Figura 35 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores, para a planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	111
Figura 36 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores para a planta desequilibrada	113
Figura 37 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores, baseado nos valores medidos em 2018.....	113
Figura 38 – Corrente e tensão dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros da planta desequilibrada	118
Figura 39 – Comparativo entre os valores de THDi dos respectivos QGBTs antes e depois da inserção dos filtros na planta desequilibrada.....	119

Figura 40 – Amplitudes das componentes harmônicas de corrente com filtros <i>shunt</i> na planta desequilibrada	120
Figura 41 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros na planta desequilibrada.....	121
Figura 42 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores obtidas via simulação da planta desequilibrada com inserção dos filtros	123
Figura 43 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Indicadores de distorções harmônicas	37
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	39
Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas de corrente	40
Tabela 3 – Especificações do alimentador	57
Tabela 4 – Características elétricas dos transformadores	59
Tabela 5 – Dados obtidos e tratados das medições nos QGBTs para o sistema equilibrado	61
Tabela 6 – Dados tratados das medições realizadas na subestação em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019 para o sistema equilibrado	61
Tabela 7 – Variação percentual das grandezas elétricas nos QGBTs entre 2018 e 2023	62
Tabela 8 – Valores obtidos de F_{disti} , F_{distv} e F_{desl} para planta equilibrada.....	62
Tabela 9 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs	63
Tabela 10 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema equilibrado.....	64
Tabela 11 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema equilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019.....	65
Tabela 12 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta equilibrada.....	66
Tabela 13 – Valores de erro relativo obtidos entre os valores medidos e valores simulados	66
Tabela 14 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta equilibrada com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019	67
Tabela 15 - Variação percentual das grandezas elétricas obtidos via simulação da planta equilibrada entre os anos de 2018 e 2023.....	68
Tabela 16 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta equilibrada	71
Tabela 17 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta equilibrada com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	72
Tabela 18 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT	74
Tabela 19 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	75
Tabela 20 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs	77

Tabela 21 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019	78
Tabela 22 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs	80
Tabela 23 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.	80
Tabela 24 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L	82
Tabela 25 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022	82
Tabela 26 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, baseado nos dados obtidos em 2018	83
Tabela 27 – Valores das grandezas dos respectivos QGBTs com a inserção dos filtros, obtidos via simulação da planta equilibrada	86
Tabela 28 – Valores das amplitudes das componentes harmônicas de corrente em cada fase dos respectivos QGBTs com inserção dos filtros	88
Tabela 29 – Valores das amplitudes das harmônicas de ordem múltipla de três na corrente do condutor de neutro dos QGBTs com filtros	89
Tabela 30 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros	90
Tabela 31 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros	92
Tabela 32 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L com inserção dos filtros	93
Tabela 33 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022 com inserção dos filtros	94
Tabela 34 – Dados obtidos e tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado	95
Tabela 35 – Dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	95
Tabela 36 – Variação percentual das grandezas elétricas nos QGBTs entre 2018 e 2023	96
Tabela 37 – Valores obtidos de F_{disti} , F_{distv} e F_{desl} para planta desequilibrada	96
Tabela 38 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs para a planta desequilibrada	97

Tabela 39 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema desequilibrado	98
Tabela 40 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema desequilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	98
Tabela 41 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta real	99
Tabela 42 – Valores de erro relativo obtidos entre os valores medidos e valores simulados para planta desequilibrada.....	100
Tabela 43 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	101
Tabela 44 – Variação percentual das grandezas elétricas obtidas via simulação da planta desequilibrada nos QGBTs entre 2018 e 2023	101
Tabela 45 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta desequilibrada.....	105
Tabela 46 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	106
Tabela 47 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, para a planta desequilibrada	108
Tabela 48 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019, para planta desequilibrada.....	109
Tabela 49 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs para planta desequilibrada	111
Tabela 50 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, para a planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019	112
Tabela 51 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, para a planta desequilibrada.....	114
Tabela 52 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, baseado nos valores obtidos em 2018, para a planta desequilibrada	114
Tabela 53 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L com inserção dos filtros	115
Tabela 54 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, para a planta desequilibrada.....	116

Tabela 55 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, baseado nos valores obtidos em 2018, para a planta desequilibrada.	117
Tabela 56 – Valores das grandezas dos respectivos QGBTs com a inserção dos filtros, obtidos via simulação da planta desequilibrada	118
Tabela 57 – Valores das amplitudes das componentes harmônicas de corrente em cada fase dos respectivos QGBTs com inserção dos filtros na planta desequilibrada	120
Tabela 58 – Valores das amplitudes das harmônicas de ordem múltipla de três na corrente do condutor de neutro dos QGBTs com filtros na planta desequilibrada.....	122
Tabela 59 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros	123
Tabela 60 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta desequilibrada com inserção dos filtros	124
Tabela 61 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L com inserção dos filtros na planta desequilibrada	126
Tabela 62 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, para a planta desequilibrada.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C_{sh}	Capacitância do filtro <i>shunt</i>
C_{sh_Y}	Capacitância filtro <i>shunt</i> para conexão em delta
$C_{sh_{\Delta}}$	Capacitância filtro <i>shunt</i> para conexão em estrela
$DITH\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
$DTT\%$	Distorção harmônica total de tensão
$DTTp\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
$DTTI\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
$DTT3\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
$FDesl$	Fator de deslocamento
$FDisti$	Fator de distorção de corrente
$FDistv$	Fator de distorção de tensão
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator de potência
f	Frequência da rede de alimentação
h	Ordem harmônica
h_3	Máxima ordem harmônica múltipla de 3
h_i	Máxima ordem harmônica ímpar
h_{max}	Ordem harmônica máxima
h_p	Máxima ordem harmônica par
I_{ef_1}	Corrente eficaz da componente fundamental
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
I_n^2	Corrente nominal no enrolamento de baixa tensão do transformador
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
L	Indutância da carga linear
L_{alim}	Impedância do alimentador
L_{sh}	Indutância do filtro <i>shunt</i>
L_{trafo}	Indutância do transformador
M_1	Amplitude da componente fundamental;
M_h	Amplitude da componente harmônica de ordem h

P_{cobre}	Perdas no cobre
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
P_{totais}	Perdas totais
P_{vazio}	Perdas em vazio
Q_{cap}	Potência reativa monofásica fornecida pelo capacitor
Q_{desl}	Potência reativa de deslocamento
QGBT	Quadro geral de baixa tensão
R	Resistência da carga linear
R_1	Resistência acumulada no ponto de conexão
R_{alim}	Resistência do alimentador
R_{sh}	Resistência de cada fase do filtro <i>shunt</i>
R_{trafo}	Resistência do transformador
S_{trafo}	Potência trifásica nominal do transformador
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorção Harmônica Total)
THDi	Distorção Harmônica Total da Corrente
THDv	Distorção Harmônica Total da Tensão
V_1	Tensão fundamental medida.
V_{ef1}	Tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental
V_F	Tensão de fase
V_h	Tensão harmônica de ordem h ;
V_L	Tensão de linha no enrolamento de baixa tensão
X_1	Reatância acumulada no ponto de conexão
X_{alim}	Reatância do alimentador
X_L	Valor da reatância indutiva da carga linear
X_{trafo}	Reatância do transformador
$Z_{\%}$	Impedância percentual do transformador
φ	Ângulo da corrente da componente fundamental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa	21
1.2	Definição do Problema	23
1.3	Objetivo Geral.....	24
1.4	Objetivos Específicos	24
1.5	Estrutura do Trabalho.....	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	Harmônicas.....	26
2.1.1	Cargas geradoras de harmônicos	31
2.1.1.1	<i>Transformadores.....</i>	<i>31</i>
2.1.1.2	<i>Motores e geradores</i>	<i>32</i>
2.1.1.3	<i>Conversores de potência</i>	<i>32</i>
2.1.1.4	<i>Dispositivos a arco</i>	<i>32</i>
2.2	Efeitos das distorções harmônicas	33
2.2.1	Motores Elétricos	33
2.2.2	Transformadores.....	34
2.2.3	Dispositivos de proteção	34
2.2.4	Condutores elétricos	35
2.2.5	Medidores de energia elétrica	36
2.3	Normas e recomendações.....	36
2.3.1	Módulo 8 do PRODIST	36
2.3.2	IEEE Std 519-2022	40
2.4	Correção das distorções harmônicas	41
2.4.1	Filtro <i>Shunt</i> Sintonizado	41
2.4.2	Filtro <i>Shunt</i> de Bloqueio.....	43
2.4.3	Filtro <i>Shunt</i> Amortecido.....	44
2.5	Caracterização da Instalação Elétrica	44
2.5.1	Instalação Elétrica do IFSC Câmpus Florianópolis	45
3	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	46
4	ESTUDO DE CASO	55
4.1	MODELAGEM DA PLANTA.....	55
4.1.1	Sistema trifásico equilibrado	60
4.1.1.1	<i>Análise e validação da modelagem da planta equilibrada</i>	<i>65</i>
4.1.1.1.1	<i>Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs.....</i>	<i>70</i>
4.1.1.1.2	<i>Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs</i>	<i>73</i>
4.1.1.1.3	<i>Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores</i>	<i>76</i>
4.1.1.2	<i>Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022</i>	<i>81</i>
4.1.1.3	<i>Projeto do filtro.....</i>	<i>83</i>
4.1.1.3.1	<i>Análise da THDi e demais grandezas nos QGBTs com filtros shunt</i>	<i>85</i>

4.1.1.3.2	<i>Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs com filtros shunt.....</i>	<i>87</i>
4.1.1.3.3	<i>Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs com filtros shunt</i>	<i>88</i>
4.1.1.3.4	<i>Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores com filtros shunt.....</i>	<i>90</i>
4.1.1.3.5	<i>Comparação com as soluções propostas nos estudos de 2019</i>	<i>92</i>
4.1.1.4	<i>Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022 com filtros shunt.....</i>	<i>93</i>
4.1.2	<i>Sistema trifásico real.....</i>	<i>94</i>
4.1.2.1	<i>Análise e validação da modelagem da planta desequilibrada.....</i>	<i>99</i>
4.1.2.1.1	<i>Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs.....</i>	<i>103</i>
4.1.2.1.2	<i>Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs</i>	<i>106</i>
4.1.2.1.3	<i>Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores.....</i>	<i>110</i>
4.1.2.2	<i>Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022 ..</i>	<i>115</i>
4.1.2.3	<i>Projeto do filtro.....</i>	<i>117</i>
4.1.2.3.1	<i>Análise da THDi e demais grandezas nos QGBTs</i>	<i>117</i>
4.1.2.3.2	<i>Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs com filtros shunt.....</i>	<i>119</i>
4.1.2.3.3	<i>Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs com filtros shunt</i>	<i>121</i>
4.1.2.3.4	<i>Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores com filtros shunt.....</i>	<i>122</i>
4.1.2.3.5	<i>Comparação com as soluções propostas nos estudos de 2019</i>	<i>125</i>
4.1.2.4	<i>Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022 ..</i>	<i>125</i>
5	CONCLUSÃO	127
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	127
	REFERÊNCIAS	128
	APÊNDICE A – MODELAGEM DA PLANTA EQUILIBRADA SEM OS FILTROS SHUNT.....	132
	APÊNDICE B – MODELAGEM DA PLANTA EQUILIBRADA COM OS FILTROS SHUNT.....	135
	APÊNDICE C – MODELAGEM DA PLANTA DESEQUILIBRADA SEM OS FILTROS SHUNT.....	138

APÊNDICE D – MODELAGEM DA PLANTA DESEQUILIBRADA COM OS FILTROS	
<i>SHUNT</i>.....	141

1 INTRODUÇÃO

Os componentes eletrônicos estão se tornando cada vez mais populares em uma variedade de setores, incluindo residencial, comercial e industrial. Esta tendência tem sido impulsionada pelo constante avanço da tecnologia, em que a diversidade de dispositivos eletrônicos disponíveis para os consumidores aumentou consideravelmente com o passar dos anos.

Nos dias atuais dificilmente encontramos uma residência que não possua componentes e equipamentos eletrônicos, como carregadores de celulares, computadores, televisões, entre diversos outros aparelhos de uso comum no dia a dia de todas as pessoas. Este avanço nos equipamentos e componentes eletrônicos trazem diversos benefícios, porém por serem cargas não-lineares, também implicam na ocorrência de distorções harmônicas.

Segundo a ANEEL (2021), distorções harmônicas “são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”.

Essas distorções causam diversos efeitos indesejáveis, como mau funcionamento de equipamentos, queima de componentes, medições incorretas de energia elétrica, aquecimento de motores, problemas na operação de disjuntores, entre outros efeitos. Também acarretam problemas no sistema elétrico, pois a presença de correntes harmônicas circulando no sistema causa aumento das perdas elétricas, limitação da capacidade de transporte de demanda, além de possível ocorrência de ressonâncias harmônicas em certos pontos do sistema (KAGAN *et al.*, 2009).

1.1 Justificativa

Nos últimos anos, cada vez mais se ouve falar sobre qualidade de energia elétrica no setor elétrico. Segundo o PRODIST (ANEEL, 2021), harmônicos são fenômenos de regime permanente associados a qualidade da energia entregue ao consumidor.

Com o aumento do uso de cargas não-lineares nas residências, é possível notar um aumento dos níveis das correntes harmônicas nos sistemas elétricos, que prejudicam a qualidade da energia elétrica comercializada pelas concessionárias. O consumidor residencial como um só, pode possuir níveis de distorções harmônicas aceitáveis, porém ao somar diversas residências de um determinado alimentador, juntamente com um consumidor de grande porte, a distorção total presente neste alimentador será elevada. Sem o devido controle e correção dessas distorções a energia entregue ao consumidor será de má qualidade (FERNANDES *et al.*, 2010).

Mesmo que não fossem utilizadas cargas não-lineares e o sistema elétrico fosse linear, ainda assim teríamos queda de tensão em cada uma das frequências harmônicas, resultando no aparecimento de distorções na forma de onda de tensão. Problemas causados por qualidade de energia geram prejuízos enormes, principalmente para os consumidores, prejudicando-os com entrega de energia de má qualidade (KAGAN *et al.*, 2009). Agências reguladoras do mundo inteiro promovem normas e resoluções para regimentar os índices de qualidade de energia. No Brasil, a Resolução Normativa N° 956, de 7 de dezembro 2021 da ANEEL, estabelece os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica, definindo faixas de tensão adequadas, assim como os limites para os indicadores das distorções harmônicas totais.

A norma IEEE 519-2022 apresenta as recomendações práticas para garantir que consumidores individuais de energia conectados a um barramento de Ponto de Conexão Comum, não provoquem distorções harmônicas em outras áreas do sistema, para isto a norma apresenta limites máximos de distorção harmônica para a corrente (SILVA *et al.*, 2013). A norma define que os limites de distorção harmônica são fornecidos para reduzir os efeitos indesejáveis nos usuários e no sistema. Para que as distorções se mantenham dentro dos níveis estabelecidos é necessário que todos os usuários limitem suas emissões de correntes harmônicas a valores razoáveis com base na propriedade inerente que cada usuário tem no sistema de abastecimento e cada proprietário ou operador do sistema deve tomar medidas para diminuir os níveis de distorção de tensão (IEEE, 2022). Assim, torna-se indispensável a correção das distorções harmônicas, por acarretarem problemas no sistema elétrico como um todo.

1.2 Definição do Problema

A má qualidade de energia afeta todos os consumidores do sistema elétrico, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. Nos últimos anos, tem havido uma crescente preocupação com a qualidade da energia fornecida aos consumidores, devido aos avanços tecnológicos em todas as áreas.

As distorções harmônicas são reconhecidas como uma das principais causas de fornecimento de energia elétrica de baixa qualidade aos consumidores. Ao corrigir as distorções harmônicas, é possível melhorar a qualidade da energia fornecida, garantindo um funcionamento adequado dos equipamentos elétricos e eletrônicos. Isso resulta em uma maior eficiência energética, redução de custos operacionais, menor desgaste dos equipamentos e prolongamento de suas vidas úteis.

Instalações que possuem número elevado de cargas não-lineares, estão propensas a sofrer com os problemas causados pelas distorções harmônicas. Sendo assim, para realização do estudo de correção de distorções harmônicas, foi selecionado o Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Florianópolis para local de estudo. O Instituto possui cargas lineares e não-lineares que separadamente não possuem potência elevada, porém quando somadas totalizam um valor elevado de potência, sendo as cargas não-lineares as maiores causadoras de distorções harmônicas na instalação.

Por ser um instituto voltado para área de tecnologia, nos últimos anos houve um aumento significativo na demanda por energia elétrica devido ao crescimento da infraestrutura do Câmpus, que inclui a instalação de laboratórios de informática, aparelhos de ar condicionado e diversos outros tipos de equipamentos eletrônicos. Além disso, a busca por melhorias na eficiência energética da instalação levou à introdução de iluminação LED nos ambientes e à implantação de um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica que utiliza inversores de tensão operando em alta frequência, ou seja, equipamentos que são caracterizados por serem cargas não-lineares causando distorções harmônicas na instalação (DUPCZAK *et al.*, 2018).

Para análise, foram utilizados dados coletados neste ano na subestação do Câmpus. De acordo com o PRODIST (ANEEL, 2021), para gerar os indicadores de distorções harmônicas deve ser considerado o registro de 1.008 leituras válidas

obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. Com estes dados é possível determinar as distorções harmônicas presentes no lado de baixa tensão da subestação do Câmpus e assim projetar filtros passivos para redução das componentes harmônicas, assim como a viabilidade da utilização desses filtros.

O estudo de correção realizado, tanto como os dados coletados este ano, serão comparados com os dados obtidos em 2018, que foram utilizados de base para a realização de estudos de correção de distorção harmônica com filtros passivos no Câmpus Florianópolis, pelos autores Teodoro (2019) e Dantas (2019).

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo para a redução das componentes harmônicas no lado de baixa tensão da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis, tendo como base os dados de análise de energia obtidos no ano de 2023.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) estudar os dados de análise de energia coletados na subestação, para avaliação dos problemas causados pelas componentes harmônicas;
- b) comparar os dados obtidos no ano de 2023 com os dados obtidos no ano de 2018;
- c) efetuar a modelagem do sistema, levando em conta os elementos da instalação elétrica, as cargas presentes e as correntes harmônicas associadas a elas;
- d) dimensionar e especificar um filtro passivo para diminuição das componentes harmônicas na instalação;
- e) realizar simulações computacionais para avaliar o desempenho dos filtros;

- f) garantir que os limites de distorção harmônica estabelecidos pelas normas regulatórias sejam atendidos;
- g) comparar solução proposta neste estudo com as que foram apresentadas nos estudos de 2018.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 capítulos, com o intuito de fornecer uma organização clara e abrangente. O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, a definição do problema a ser estudado e a justificativa para demonstrar a importância e relevância do estudo realizado.

No segundo capítulo, é apresentada a fundamentação teórica, abordando conceitos sobre harmônicas, suas causas, os efeitos que podem gerar no sistema elétrico e nos equipamentos, bem como sua influência negativa na qualidade da energia. Além disso, são discutidas as normas e recomendações relevantes, bem como os filtros que podem ser utilizados para a correção das distorções harmônicas. Também é feita a apresentação da instalação elétrica específica na qual o estudo de correção será realizado.

O terceiro capítulo trata da metodologia a ser aplicada no trabalho, estabelecendo os passos e procedimentos a serem seguidos para obter a correção da distorção harmônica.

O quarto capítulo apresenta a análise do sistema elétrico, a modelagem da planta elétrica, a avaliação das distorções harmônicas nos QGBTs e a verificação da conformidade com a IEEE Std 519-2022. Também apresenta o dimensionamento de filtros passivos, simulações computacionais para validar sua eficácia e a comparação dos resultados com estudos anteriores, destacando a evolução do perfil harmônico da instalação.

O quinto capítulo apresenta as conclusões finais e as sugestões para os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de abordar amplamente a teoria relacionada às distorções harmônicas e suas correções, devido à ampla utilização de equipamentos que geram harmônicas em diversos setores, foram explorados os principais equipamentos que geram harmônicas, os impactos dessas harmônicas no sistema elétrico e nos equipamentos, bem como as soluções disponíveis para corrigir essas distorções.

Além disso, foram discutidas as diretrizes e orientações relacionadas à qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores, bem como os limites estabelecidos por essas normas, a fim de manter um padrão adequado na entrega de energia elétrica.

Os filtros existentes no mercado para correção das distorções harmônicas também foram apresentados, com objetivo de selecionar a opção mais adequada para o caso em estudo. Foram considerados critérios como eficiência, custo, capacidade de supressão de harmônicas e compatibilidade com o sistema elétrico em questão. A compreensão das características e funcionamento desses filtros será fundamental para a tomada de decisão quanto à sua aplicação e para garantir uma correção eficaz das distorções harmônicas no sistema elétrico.

2.1 Harmônicas

A má qualidade de energia pode acarretar problemas em todos os consumidores do sistema elétrico, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. À medida que o tempo avança e ocorre um progresso tecnológico em todas as áreas, observa-se uma crescente preocupação com a qualidade da energia fornecida aos consumidores (SILVA, 2007).

Para o consumidor residencial, geralmente a qualidade da energia entregue se refere a não interrupção de fornecimento, já que os dispositivos presentes nas residências não aparentam para os consumidores à primeira vista que estejam enfrentando os problemas decorrentes da entrega de energia de qualidade inferior. Porém para o consumidor industrial, ter conhecimento sobre qualidade da energia entregue a ele se torna indispensável, pois em sua maioria, as indústrias possuem

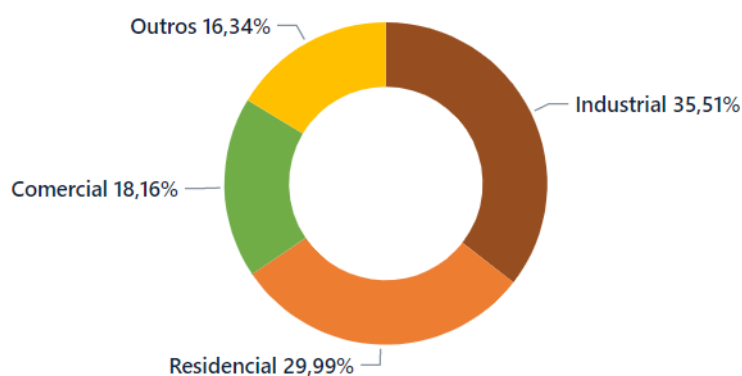
equipamentos e dispositivos sensíveis aos padrões de energia entregues (SILVA, 2007).

Além dos equipamentos industriais, é importante destacar que equipamentos hospitalares também são altamente sensíveis e dependentes de energia elétrica de qualidade para operar corretamente (ORTMANN, 2008).

Na Figura 1 é apresentado o consumo médio por classe do ano de 2018 até o ano de 2023, estes dados são mensurados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Por serem os principais consumidores de energia elétrica em termos de média de consumo, as indústrias são particularmente mais afetadas pelos efeitos negativos de uma energia de baixa qualidade. Por outro lado, os equipamentos industriais em funcionamento também podem gerar distorções e problemas adicionais na rede elétrica, ampliando os desafios enfrentados para manter uma distribuição de energia estável e confiável. Portanto, não apenas são impactados de maneira significativa pelas distorções, mas também contribuem ativamente para a amplificação dessas distorções na rede elétrica.

Figura 1 – Consumo médio por classe dos anos de 2018 a 2023
CONSUMO MÉDIO POR CLASSE



Fonte: EPE (2023).

Com o objetivo de alcançar níveis mais altos de eficiência e produtividade, a integração de equipamentos eletrônicos tornou-se cada vez mais presente em diversos setores. Estes equipamentos incorporam uma variedade de dispositivos, como fontes chaveadas, conversores estáticos, motores de indução, transformadores

e outros componentes de processamento que incluem tiristores, diodos e materiais semicondutores. Essas cargas são então classificadas como não-lineares devido à sua natureza de operação (SEIDLER, 2022). O crescente aumento de cargas não lineares tanto em ambientes industriais quanto residenciais tem resultado em uma poluição significativa na rede elétrica, devido ao elevado conteúdo harmônico das correntes consumidas por essas cargas (ORTMANN, 2008).

Além das cargas não-lineares encontradas em instalações residenciais e industriais, é importante destacar que grandes conversores estáticos de potência e dispositivos eletrônicos utilizados nos sistemas de transmissão também são fontes significativas de distorções na rede elétrica e, devido ao tamanho e complexidade, são mais difíceis de serem modelados e simulados com precisão (VARIZ, 2008). Esses equipamentos dependem de forma crucial da qualidade da energia fornecida para o seu correto funcionamento. Por outro lado, eles também são grandes responsáveis pela introdução de distorções na rede elétrica. Assim, é indispensável compreender e analisar adequadamente o comportamento desses equipamentos, assim como a interação deles com a rede elétrica (VARIZ, 2008).

Segundo Dugan (2003), a qualidade de energia elétrica é caracterizada como a presença de problemas na tensão, corrente ou frequência, que podem resultar em falhas ou operação inadequada nos equipamentos dos consumidores. Os principais problemas associados à qualidade de energia elétrica são definidos pelo autor como:

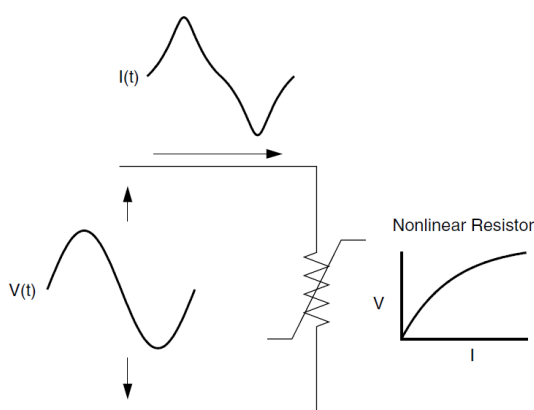
- a) transitórios impulsivos e oscilatórios;
- b) variações de tensão de longa duração;
- c) variações de tensão de curta duração;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) distorção na forma de onda;
- f) flutuação de tensão;
- g) variações no fator de potência.

Dentre as distorções na forma de onda, Dugan (2003) descreve que há cinco tipos primários de distorções na forma de onda, sendo eles *DC offset*, harmônicos, interharmônicos, *notching* e ruído.

Como comentado anteriormente, distorções harmônicas são causadas por cargas não-lineares, que são cargas em que a corrente não é proporcional a tensão aplicada. Desde as décadas de 1930 e 1940, a literatura técnica já evidenciava a preocupação em relação aos problemas decorrentes das distorções harmônicas. Naquela época, as principais fontes de harmônicos eram os transformadores, e o impacto dessas distorções estava relacionado à interferência na rede telefônica. Portanto, muito antes da introdução de dispositivos eletrônicos que ampliaram significativamente as distorções harmônicas na rede elétrica, já existia uma conscientização sobre os efeitos dessas distorções e a necessidade de corrigi-las (DUGAN, 2003).

A Figura 2 mostra uma forma de onda de tensão aplicada a um resistor não linear. Pode-se notar que enquanto a forma de onda de tensão é uma senoide perfeita, a corrente resultante é distorcida (DUGAN, 2003).

Figura 2 – Distorção de corrente causado por resistor não-linear

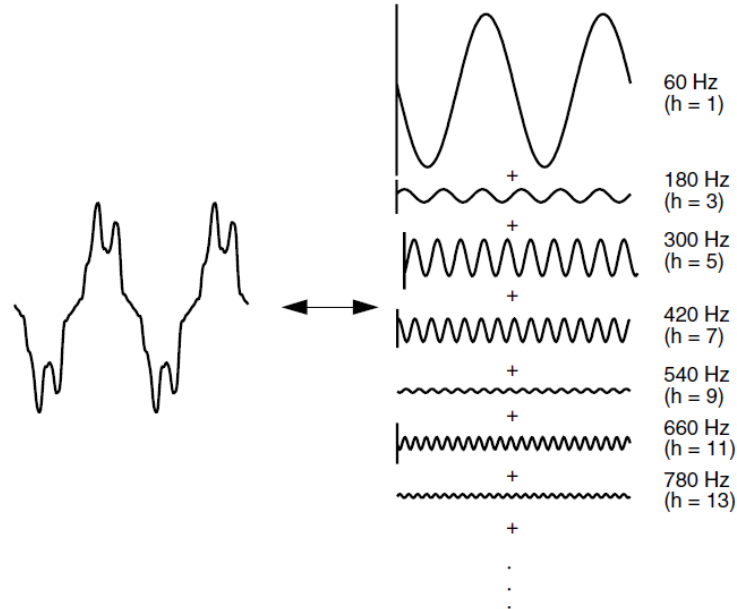


Fonte: Dugan (2003).

Qualquer onda periódica distorcida pode ser expressa como uma soma de senoides. Se uma forma de onda é igual de um ciclo para o próximo, é possível representá-la como a soma de senoides puras em que a frequência de cada senoide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da forma de onda distorcida, tal soma de senoides é chamada de série de Fourier. A Figura 3 mostra que com o uso da série

de Fourier, é possível separar os componentes harmônicos resultantes que compõem um sinal distorcido (DUGAN, 2003).

Figura 3 – Representação da série de Fourier de uma forma de onda distorcida



Fonte: (Dugan) 2003.

Pode-se determinar também a distorção harmônica total (*THD*), segundo Dugan (2003, p. 181, tradução nossa), a *THD* é “uma medida do valor efetivo dos componentes harmônicos de uma forma de onda distorcida.”

A *THD* pode ser calculada para tensão ou corrente pela Equação 1.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{m\acute{a}x}} M_h^2}}{M_1} \quad (1)$$

Sendo:

THD: distorção harmônica total;

M_1 : amplitude da componente fundamental;

M_h : amplitude da componente harmônica de ordem h ;

h : ordem da harmônica;

$h_{m\acute{a}x}$: maior ordem de harmônica presente na somatória.

Desta forma, a série de Fourier é utilizada para quantificar as componentes harmônicas de tensão e de corrente.

2.1.1 Cargas geradoras de harmônicos

As cargas incluem uma variedade de dispositivos, tais como equipamentos ferromagnéticos, conversores de potência e dispositivos que operam com arco elétrico (SOUSA, 2019).

Ao longo do tempo, transformadores e máquinas elétricas deixaram de ser os grandes geradores de harmônicas, devido ao desenvolvimento tecnológico conforme mencionado anteriormente, sendo então os componentes eletrônicos os principais geradores de harmônicos, por serem cargas de natureza não-linear. Porém, ainda assim, transformadores e máquinas rotativas continuam sendo geradores de harmônicos (TEIXEIRA, 2009).

2.1.1.1 Transformadores

Conforme abordado por Sousa (2019), é fundamental utilizar os transformadores fora da região de saturação para evitar a geração de harmônicos. Nesta condição, a corrente varia de forma linear em relação à tensão. Caso contrário, se a corrente não variar de maneira linear em resposta à tensão, ocorrerão correntes harmônicas.

Os transformadores são projetados para operarem abaixo do “ponto de joelho” da curva de magnetização, porém, em condições de carregamento reduzido (baixa corrente e carga) em transformadores de distribuição nas primeiras horas da manhã, o efeito da saturação da magnetização na corrente torna-se mais pronunciado fazendo com que a mesma se apresente rica em harmônicos. (NIELSON, 2013, p. 33).

Além de contribuírem para a introdução de harmônicos indesejados na rede elétrica, os transformadores também são afetados pelas consequências desses harmônicos. Portanto, é essencial garantir que os transformadores sejam operados em condições adequadas para evitar a introdução de harmônicos indesejados na rede elétrica.

2.1.1.2 Motores e geradores

Assim como os transformadores, motores e geradores contribuem para a introdução de harmônicos na rede elétrica, porém também são prejudicados pela presença de harmônicos na rede.

Segundo Teixeira (2009) “os harmônicos no tempo são produzidos pelos motores de indução, como resultado do conteúdo harmônico da distribuição espacial da f.m.m. e são dependentes da velocidade.”

Desta forma, estes equipamentos são geradores de harmônicos devido a forma construtiva que possuem, pois as ranhuras presentes nos rotores e estatores dos motores criam variações no fluxo magnético, podendo levar a geração de corrente harmônicas nos enrolamentos (SOUSA, 2019).

2.1.1.3 Conversores de potência

O uso de sistemas de corrente contínua tem crescido significativamente. Estes sistemas podem ser empregados como retificadores de tensão ou inversores de frequência, resultando em frequências distintas em comparação aos sistemas de distribuição convencionais. Com o aumento do uso de sistemas de corrente contínua, como retificadores e inversores, que geram frequências diferentes dos sistemas de distribuição em corrente alternada, os conversores estáticos controlados se tornaram uma das principais fontes de correntes harmônicas na rede elétrica (TEIXEIRA, 2009).

2.1.1.4 Dispositivos a arco

Os dispositivos que fazem uso de arcos elétricos, como fornos e soldadores a arco, além de sistemas de iluminação com reatores magnéticos, são amplamente utilizados em várias aplicações. Segundo Dugan (2003), o comportamento tensão-corrente em arcos elétricos é caracterizado por uma não linearidade, uma vez que durante o arco, a corrente aumenta limitada apenas pela impedância do sistema, enquanto a tensão diminui.

2.2 Efeitos das distorções harmônicas

As distorções harmônicas têm o potencial de causar problemas em uma ampla variedade de equipamentos, afetando tanto dispositivos eletrônicos sensíveis quanto componentes do sistema elétrico em si. Dentre os equipamentos que podem ser prejudicados por essas distorções, podemos mencionar: computadores, equipamentos de comunicação, sistemas de iluminação, motores elétricos, transformadores, dispositivos de controle e proteção, entre outros. É importante destacar que as distorções harmônicas podem comprometer o desempenho e a vida útil desses equipamentos, além de causar perdas de eficiência energética e aumentar os custos operacionais (KAGAN *et al.*, 2009).

As distorções harmônicas também têm impacto nos equipamentos de medição de energia. Os dispositivos de medição, como medidores de energia e analisadores de qualidade de energia, são projetados para fornecer leituras precisas e confiáveis das grandezas elétricas, porém as distorções harmônicas presentes na rede elétrica podem afetar a precisão desses equipamentos e levar a medições incorretas (VELASCO, 2007).

2.2.1 Motores Elétricos

Conforme mencionado anteriormente, os motores elétricos atuam como geradores de harmônicos, introduzindo essas perturbações indesejadas na rede, por outro lado, os motores também são afetados pelos efeitos das distorções harmônicas presentes na rede.

A presença de harmônicas de corrente em máquinas elétricas de corrente alternada, como geradores e motores elétricos, provoca um campo girante, no interior da máquina, resultante das diversas frequências que compõem a corrente. Todavia, este campo girante resultante pode ser visto como sendo a soma do campo girante da componente fundamental com os campos girantes das diversas harmônicas, que giram na frequência da harmônica correspondente. Sendo assim, estas componentes harmônicas podem criar campos que giram no mesmo sentido, ou em sentido contrário ao do campo criado pela corrente fundamental. Com isso, as componentes harmônicas afetam o torque da máquina, acarretando batimentos de torque e vibrações nos mancais e eixos, que por sua vez afetam a qualidade dos produtos de um processo industrial, além da geração de ruídos audíveis. (OLIVEIRA, 2010, p. 3).

Para os motores elétricos, o maior efeito causado pela distorção harmônica é o aquecimento devido ao aumento das perdas no cobre, afetando a eficiência do equipamento e o torque disponível. Resulta também em um desgaste acelerado dos componentes internos do motor, redução da vida útil e maior consumo de energia (SILVA, 2007).

2.2.2 Transformadores

Os transformadores desempenham um papel essencial no sistema elétrico, permitindo a modificação dos níveis de tensão de acordo com as necessidades. Em ambientes industriais, é comum a instalação de transformadores para suprir a demanda total de energia. Ao dimensionar esses equipamentos, é importante levar em consideração o percentual de componentes harmônicas de corrente que serão retidas dentro do núcleo do transformador, evitando sua emissão para o sistema de distribuição. Normalmente, esses transformadores são conectados em configuração Delta-Estrela, o que impede a saída das componentes harmônicas geradas pela instalação elétrica. Essa configuração ajuda a preservar a qualidade do fornecimento de energia, evitando interferências indesejadas e garantindo o funcionamento adequado dos equipamentos conectados ao sistema. Os harmônicos assim como nos motores, causam aumento nas perdas dos transformadores. Perdas no ferro são causadas por harmônicos de tensão e perdas no cobre são causadas por harmônicos de corrente (OLIVEIRA, 2010).

Segundo Kassick (2016), outro efeito importante é a circulação das harmônicas múltiplas ímpares de 3 nos enrolamentos conectados em delta, o que pode sobrecarregá-los se essa condição não for considerada no projeto.

2.2.3 Dispositivos de proteção

Dispositivos de proteção também são afetados pela presença de componentes harmônicas. Quando um sistema elétrico é afetado por correntes harmônicas, equipamentos de proteção como fusíveis, relés, chaves seccionadoras, religadores automáticos e outros não conseguem responder adequadamente a parâmetros claramente identificáveis na frequência fundamental. Isto ocorre porque

as correntes harmônicas podem distorcer os sinais elétricos e dificultar a detecção de falhas ou condições anormais pelos dispositivos de proteção (OLIVEIRA, 2010).

2.2.4 Condutores elétricos

A presença de correntes harmônicas em instalações elétricas pode resultar em um aumento significativo do aquecimento nos condutores em comparação com instalações elétricas sem distorção harmônica de corrente. Isso ocorre devido às características não lineares das correntes harmônicas, que resultam em uma distribuição desigual de corrente ao longo dos condutores. O sobreaquecimento dos condutores representa um risco potencial para a segurança e a vida útil dos componentes da instalação elétrica (MARQUES, 2011).

Outro efeito causado pelas componentes harmônicas em condutores elétricos é o efeito pelicular.

O efeito pelicular é uma redistribuição de corrente circulante pelo condutor, onde que a corrente deixa de circular uniformemente pelo condutor e passa a circular nas extremidades do condutor. Esse efeito está ligado a resistência dos condutores que aumenta conforme a frequência da corrente. (MARQUES, 2011, p. 38).

Além do efeito pelicular, também ocorre o aumento da corrente do condutor neutro em circuitos trifásicos.

No caso de sistemas trifásicos, ainda pode haver a elevação da corrente do condutor de neutro, devido à circulação de harmônicas triplens (múltiplas ímpares de 3) de sequência zero, que por estarem em fase entre si, se somam, atingindo valores bem maiores do que no condutor de fase. Isto faz com que o condutor de neutro fique sobrecarregado, reduzindo sua vida útil, mesmo que as cargas estejam equilibradas nas fases (OLIVEIRA, 2010, p.4).

Assim, é necessário dimensionar adequadamente os condutores e adotar medidas de mitigação para minimizar os efeitos negativos do aquecimento causado pelas correntes harmônicas.

2.2.5 Medidores de energia elétrica

A presença de harmônicas tem impacto nos medidores de energia elétrica, ocasionando erros nas medições. A magnitude desses erros está relacionada tanto ao modelo específico do medidor quanto às características das harmônicas presentes na rede elétrica. Segundo Oliveira (2010) “erros de leitura só se tornam significativos para Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi) elevada, na ordem de 20%.”

2.3 Normas e recomendações

As agências reguladoras em todo o mundo têm o papel de estabelecer normas e resoluções com o objetivo de regular e garantir a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Essas normas visam assegurar que os fornecedores de energia cumpram requisitos específicos de qualidade, como tensão adequada, frequência estável, baixa distorção harmônica, entre outros parâmetros relevantes.

2.3.1 Módulo 8 do PRODIST

No Brasil, a Resolução Normativa Nº 956, de 7 de dezembro 2021 da ANEEL estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. O Módulo 8 do PRODIST tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica na distribuição, assim como à qualidade do produto, à qualidade do serviço e à qualidade comercial. Também tem por objetivo definir os fenômenos relacionados a qualidade do produto e qualidade do serviço, assim como estabelecimento de procedimentos relacionados à apuração da qualidade comercial, como o atendimento telefônico e resolução das reclamações e outras demandas, assim como o cumprimento dos prazos. Estabelece também procedimentos para a apuração e encaminhamento das informações relativas a acidentes do trabalho e acidentes com terceiros, assim como procedimentos para a realização da compensação e envio de relatórios de acompanhamento para a ANEEL (ANEEL, 2021). No contexto deste trabalho, estamos focados nos procedimentos relacionados à qualidade do produto fornecido.

O PRODIST trata de fenômenos de regime permanente e fenômenos de regime transitórios em relação aos fenômenos associados à qualidade do produto. Dentre os fenômenos de regime permanente estão os harmônicos (ANEEL, 2021).

De acordo com o PRODIST (ANEEL, 2021), para gerar os indicadores de distorções harmônicas deve ser considerado o registro de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada.

O Quadro 1 apresenta os indicadores de distorções harmônicas segundo o PRODIST.

Quadro 1 – Indicadores de distorções harmônicas

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT_h%
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTTp%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTTi%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT3%
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTTp% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTTp95%
Valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTTi95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT395%

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

Os indicadores DIT_h%, DTT%, DTTp%, DTTi% e DTT3% são calculados conforme as Equações 2, 3, 4, 5 e 6 (ANEEL, 2021) apresentadas a seguir:

$$DIT_h \% = \frac{\sqrt{V_h}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

DIT_h %: Distorção harmônica individual de tensão de ordem h ;

V_h : tensão harmônica de ordem h ;

h : ordem harmônica individual;

V_1 : tensão fundamental medida.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

$DTT\%$: distorção harmônica total de tensão;

h : todas as ordens harmônicas de 2 até h_{max} ;

h_{max} : ordem harmônica máxima;

V_h : tensão harmônica de ordem h ;

V_1 : tensão fundamental medida.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

$DTT_p\%$: distorção harmônica total de tensão;

h : todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3;

h_p : máxima ordem harmônica par;

V_h : tensão harmônica de ordem h ;

V_1 : tensão fundamental medida.

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

Sendo:

$DTT_i\%$: distorção harmônica individual de tensão de ordem h ;

h : todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3;

h_i : máxima ordem harmônica ímpar;

V_h : tensão harmônica de ordem h ;

V_1 : tensão fundamental medida.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

$DTT_3\%$: distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3;

h : todas as ordens harmônicas múltiplas de 3;

h_3 : máxima ordem harmônica múltipla de 3;

V_h : tensão harmônica de ordem h ;

V_1 : tensão fundamental medida.

A Tabela 1 apresenta os limites para os indicadores de distorções harmônicas segundo o PRODIST.

Tabela 1 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n < 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTTp95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTi95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT395%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de ANEEL (2021).

2.3.2 IEEE Std 519-2022

A IEEE é uma instituição conceituada e respeitada internacionalmente, comprometida com o progresso tecnológico. Seus documentos fornecem diretrizes a serem seguidas quando não há regulamentações nacionais específicas sobre um determinado assunto (SEIDLER, 2022).

A IEEE Std 519 define que os limites de distorção harmônica são fornecidos para reduzir os efeitos indesejáveis nos usuários e no sistema. Os limites são avaliados com tensão de 120 V e 69 kV, trazendo valores que são medidos no Ponto de Conexão Comum (IEEE, 2022).

A Tabela 2 apresenta os limites para os indicadores de distorções harmônicas segundo a IEEE.

Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas de corrente

<i>Ordem das Harmônicas Ímpares Individuais^{a,b}</i>						
I_{sc} / I_L	3 ≤ h ≤ 11	11 ≤ h ≤ 17	17 ≤ h ≤ 23	23 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h ≤ 50	TDD
20^c	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

Sendo:

a: As harmônicas pares são limitadas a 25% da harmônica ímpar superior;

b: Distorções de corrente que resultam em componentes contínuas;

c: Todos os equipamentos de geração de energia são limitados a esses valores de distorção de corrente, independentemente da razão I_{sc} / I_L ;

I_{sc} : Corrente máxima de curto-circuito no Ponto de Conexão Comum;

I_L : Corrente de carga máxima demandada na componente de frequência fundamental no PCC, em condições normais de operação de carga.

Fonte: Adaptado de IEEE (2022).

Desta forma, a norma será utilizada como referência para verificar se as componentes harmônicas estão dentro dos padrões aceitáveis e estabelecidos.

2.4 Correção das distorções harmônicas

Existem várias soluções disponíveis para corrigir distorções harmônicas, sendo uma delas a utilização de filtros de harmônicas. Esses filtros podem ser classificados em dois tipos principais: filtros passivos e filtros ativos. Os filtros passivos são compostos por componentes lineares e passivos, como resistores, indutores e capacitores. Já os filtros ativos utilizam eletrônica para produzir componentes que anulem os harmônicos gerados (OLIVEIRA; QUITO, 2006).

Segundo Quadros (1999), as vantagens de se utilizar filtros passivos são a boa confiabilidade, baixo custo de implementação, baixo custo de manutenção e perdas reduzidas.

Na correção de distorções harmônicas, os filtros passivos são amplamente adotados em comparação aos filtros ativos. Os filtros passivos podem ser classificados como filtro *shunt* sintonizado, filtro *shunt* de bloqueio e filtro *shunt* amortecido. Neste estudo, optou-se pela utilização dos filtros passivos para a correção das distorções.

2.4.1 Filtro *Shunt* Sintonizado

De acordo com Kassick (2016) “os filtros sintonizados criam caminhos de baixa impedância, aprisionando as componentes harmônicas de corrente, impedindo assim que sejam injetadas no sistema, através do transformador de alimentação.”

O filtro *shunt* é tipicamente dimensionado para suportar exclusivamente a corrente harmônica específica com a qual está sintonizado, adicionada a uma corrente fundamental consideravelmente inferior à corrente do circuito principal. Portanto, o filtro *shunt* se mostra mais econômico em comparação a um filtro série com a mesma eficácia (TEIXEIRA, 2009).

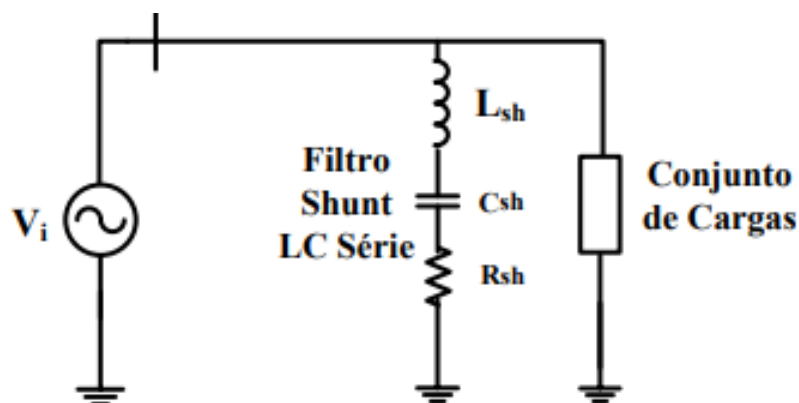
Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014), um filtro de dupla sintonia é uma extensão de um filtro de sintonia simples, porém sintonizado para duas frequências. A primeira frequência ressonante é determinada pelo ramo série do filtro,

enquanto a segunda ocorre quando a impedância do ramo paralelo é igual ao conjugado da impedância do ramo série, resultando em um valor real.

Além disto, o projeto adequado de tais filtros possibilita que os capacitores empregados efetuem também a correção do fator de deslocamento relativo às componentes fundamentais (60 Hz) da tensão e da corrente do sistema, levando o fator de deslocamento F_{Desl} para valores próximos da unidade e, pela ação de filtragem, fazendo o mesmo com o fator de distorção F_{Dist} , disto resultando fator de potência (verdadeiro) próximo da unidade (KASSICK, 2016, p.44).

A Figura 4 apresenta a ligação do filtro *shunt* LC série.

Figura 4 – Conexão e circuito típico de filtro *shunt*

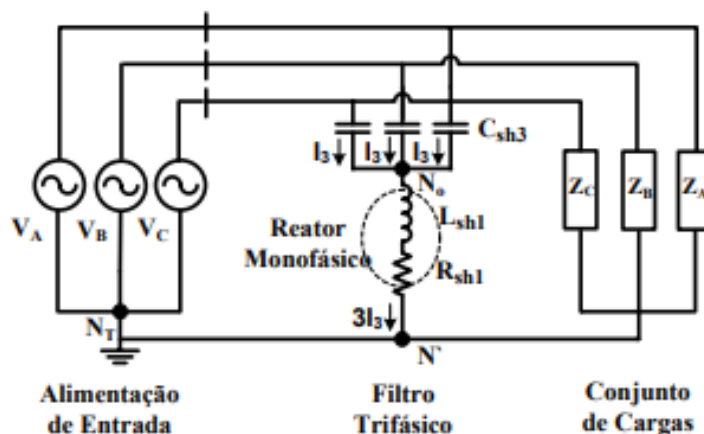


Fonte: Oliveira (2010).

O filtro *shunt* LC série trifásico com reator trifásico possui uma configuração em que o reator é conectado em série com um banco de capacitores, formando um circuito LC. Derivado deste filtro, temos o filtro *shunt* LC série trifásico com reator monofásico, conhecido também como filtro 3C1L. Este filtro possui uma configuração com três capacitores, conectados em estrela ou delta, para sintonizar múltiplas frequências ou suavizar o efeito de harmônicas de diferentes ordens. Sua configuração consiste também de uma única indutância trifásica, normalmente compartilhada entre as fases para controlar a ressonância. Outra característica deste filtro é a sua limitação a correntes que apresentam defasagem diferente de zero, ou seja, este tipo de filtro só pode ser projetado para correntes harmônicas múltiplas de três, diferentemente do filtro *shunt* convencional (OLIVEIRA, 2010).

A Figura 5 apresenta a estrutura do filtro 3C1L.

Figura 5 – Estrutura do filtro 3C1L



Fonte: Oliveira (2010).

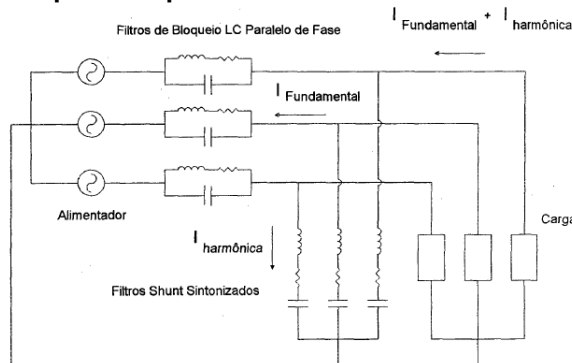
2.4.2 Filtro *Shunt* de Bloqueio

Segundo Quadros (1999), “os filtros de bloqueio são elementos que tratam de auxiliar a filtragem passiva realizada por filtros *shunt* sintonizados, porém nunca podendo substituí-los por completo.”

Este tipo de filtro funciona criando um caminho de elevada impedância, buscando reduzir a circulação de correntes harmônica do sistema, tanto nas fases quanto no neutro. Associados a um filtro *shunt* sintonizado, aumenta a qualidade da filtragem *shunt* de harmônicas não múltiplas de três, principalmente as de baixa frequência como a 5ª e 7ª (QUADROS; KASSICK, 2001).

Os filtros de bloqueio paralelo podem ser divididos em duas estruturas: filtro de bloqueio paralelo de fase e filtro de bloqueio paralelo de neutro. A estrutura mais conhecida é a de bloqueio paralelo de fase, apresentando as mesmas características que o filtro de bloqueio paralelo genérico (QUADROS, 1999). A Figura 6 apresenta o filtro de bloqueio paralelo de fase inserido em um sistema trifásico equilibrado.

Figura 6 – Filtro de bloqueio LC paralelo de fase em um sistema trifásico equilibrado

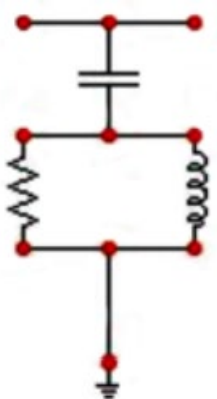


Fonte: Quadros (1999).

2.4.3 Filtro *Shunt* Amortecido

De acordo com Pires (2010) filtros *shunt* amortecidos são “filtros passa-alta que apresentam uma baixa impedância a partir da frequência de ressonância”. Possui um capacitor em série com um RL paralelo em sua configuração, conforme apresentado na Figura 7, sendo muitas vezes aplicado junto a filtros sintonizados para correção de correntes harmônicas (PIRES, 2010).

Figura 7 – Filtro *shunt* amortecido



Fonte: Pires (2010).

2.5 Caracterização da Instalação Elétrica

Definir o tipo de instalação na qual o estudo de correção de harmônicas será realizado, seja ela industrial, comercial ou residencial é essencial. No caso deste

trabalho, estamos focando em uma instalação comercial, assim, é preciso compreender sua estrutura e as cargas elétricas presentes.

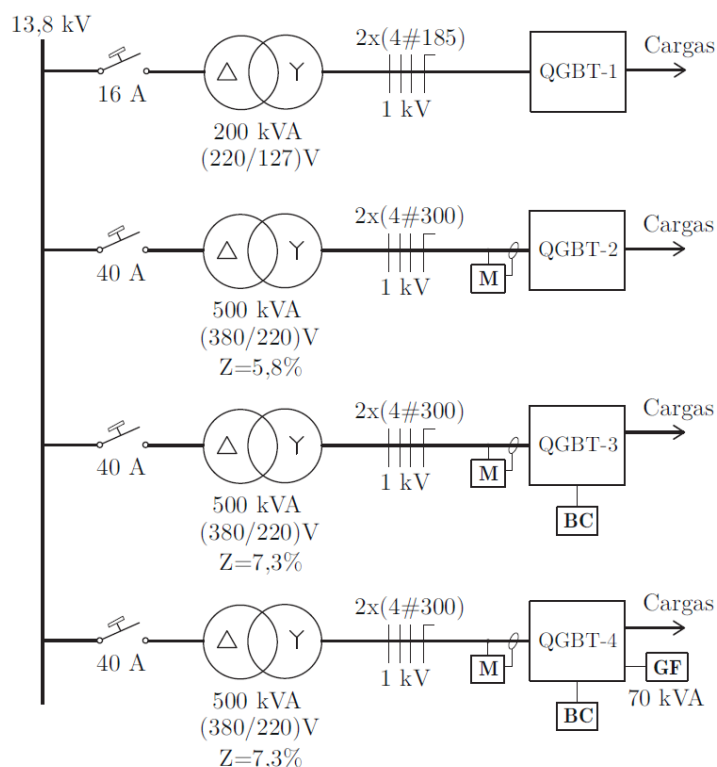
As instalações comerciais englobam shoppings, supermercados, universidades, hospitais e outros estabelecimentos. Essas instalações são caracterizadas por uma variedade de cargas não-lineares, predominantemente dispositivos eletrônicos, tais como iluminação com lâmpadas de LED, condicionadores de ar, computadores, fontes de alimentação e uma variedade de outros equipamentos similares (TEODORO, 2019).

De acordo com Oliveira (2010), as instalações elétricas comerciais apresentam algumas características distintivas. Entre elas, destacam-se cargas com baixas potências individuais, porém com alta potência total na instalação. Além disso, essas instalações são suscetíveis a variações repentinas de consumo, possuem um baixo fator de deslocamento devido à grande quantidade de aparelhos de condicionamento de ar e possuem um conteúdo harmônico elevado devido à presença abundante de cargas eletrônicas comumente utilizadas em instalações comerciais.

2.5.1 Instalação Elétrica do IFSC Câmpus Florianópolis

A infraestrutura do IFSC Câmpus Florianópolis, local onde será realizado o estudo para correção de distorção harmônica deste trabalho, é suprida por uma subestação abrigada de 13,8 kV, que conta com três transformadores trifásicos a seco de 500 kVA e um transformador trifásico a óleo de 200 kVA, que está desativado, e na subestação estão quatro quadros gerais de distribuição. O QGBT-3 e QGBT-4 possuem banco de capacitores para a correção de fator de potência, sem a presença de filtros de harmônicas. No QGBT-4 estão conectados 70,2 kVA de módulos fotovoltaicos, que fazem parte do sistema de microgeração de energia elétrica do Câmpus (DUPCZAK, *et al.*, 2018). A Figura 8 apresenta o diagrama simplificado da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis, que ilustra as características mencionadas.

Figura 8 – Diagrama unifilar simplificado da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis



Fonte: Dupczak, *et al.* (2018).

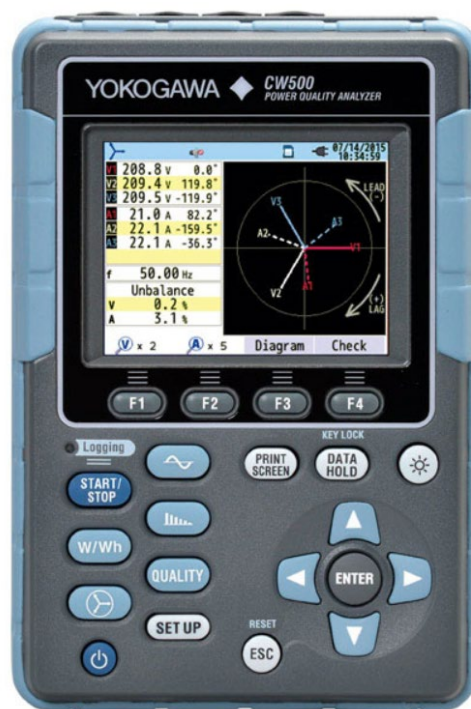
A universidade conta com uma extensa variedade de dispositivos eletrônicos, cujo número tende a crescer à medida que a infraestrutura do câmpus se expande. Isso implica na utilização de um maior número de computadores, aparelhos de ar condicionado, sistemas de iluminação com tecnologia LED e uma ampla gama de outros equipamentos que geram distorções harmônicas na instalação elétrica. Desta forma, se torna indispensável a realização de um estudo de correção para as distorções harmônicas causadas pela cargas não-lineares presentes no câmpus.

3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

É necessário estabelecer uma metodologia para realizar a correção da distorção e o projeto dos filtros. Assim, primeiramente deve ser realizado o tratamento dos dados obtidos pelo analisador de qualidade de energia utilizado para fazer as medições realizadas no período de 03/03/2023 até 13/03/2023. O modelo do equipamento é o CW500 do fabricante Yokogawa, e os dados medidos pelo

equipamento são obtidos por meio do *software* fornecido pelo fabricante. A Figura 9 apresenta o equipamento utilizado para realizar as medições.

Figura 9 – Equipamento utilizado para realização das medições



Fonte: Yokogawa (2023).

Após o tratamento dos dados, é possível então realizar a modelagem da planta elétrica da instalação, sendo necessário possuir as informações de tensão de conexão do sistema elétrico, a corrente de curto circuito e a impedância no ponto de conexão. Esses dados são fornecidos através de uma solicitação de consulta das características da instalação feita à concessionária de energia. A Figura 10 apresenta estes dados para a instalação do IFSC Câmpus Florianópolis.

Figura 10 – Características da Instalação Fornecidas pela Concessionária

EQUIPAMENTO DE PROTEÇÃO DA CELESC		
EQUIPAMENTO: RELÉ		
MODELO: FASE: 7SJ632 NEUTRO: 7SJ632		
TIPO: DIGITAL		
TENSÃO: 13,8 kV		
	NEUTRO	FASE
CORRENTE DE DISPARO:	40,000 / 40,000 [A]	400,000 / 400,000 [A]
NÚMERO DE OPERAÇÕES RÁPIDAS:	-	-
CURVA DE OPERAÇÃO RÁPIDA:	-	-
NÚMERO DE OPERAÇÕES LENTAS:	2	2
CURVA DE OPERAÇÃO LENTA:	IEC NI (0,30) / IEC NI (0,30)	IEC NI (0,10) / IEC NI (0,10)

CORRENTES DE CURTO NO PONTO DE CONEXÃO DO CONSUMIDOR				
FASE TERRA	FASE TERRA MÍNIMO	FASE TERRA ASSIMÉTRICA	TRIFÁSICA	TRIFÁSICA ASSIMÉTRICA
2524 A	193 A	2769 A	3668 A	4198 A

IMPEDÂNCIA ACUMULADA NO PONTO DE CONEXÃO			
R0	X0	R1	X1
1,052 p.u.	2,485 p.u.	0,325 p.u.	1,093 p.u.

IMPEDÂNCIA DE FALTA		40 ohms
---------------------	--	---------

OBSERVAÇÕES:	
MVA base =	100 MVA
kV base =	13,800 kV
I base =	4184 A
Z base =	1,9044 ohms

Fonte: Teodoro (2019).

Considerando as informações do ponto de conexão entre o sistema da distribuidora e o sistema do Câmpus, é necessário realizar uma avaliação do transformador presente no Ponto de Conexão Comum.

Sendo assim, o transformador de entrada pode ser representado como uma fonte de tensão isenta de harmônicas, juntamente com uma impedância em série para cada fase. Esta impedância representa a indutância de dispersão e a resistência da bobina do transformador que alimenta o sistema de cargas lineares e não lineares conectadas diretamente ao PCC (OLIVEIRA, 2010, p.56).

Também devem ser avaliadas as cargas presentes no local, de acordo com Teodoro (2019) “As cargas lineares do tipo RL, podem ser determinadas por meio da amplitude e do ângulo da corrente fundamental obtidas por intermédio de medições, que representam a atual carga instalada.”

Desta forma, podemos determinar o módulo da impedância equivalente por meio da Equação 7.

$$|Z_1| = \frac{V_{ef_1}}{I_{ef_1}} \quad (7)$$

Sendo:

Z_1 : módulo da impedância equivalente (Ω);

V_{ef_1} : valor de tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental (V);

I_{ef_1} : valor corrente eficaz da componente fundamental (A).

Com o valor do módulo da impedância equivalente e o do ângulo da corrente da componente fundamental, podemos determinar os componentes lineares de resistência e reatância indutiva, conforme as Equações 8 e 9.

$$R = |Z_1| \times \cos(\varphi) \quad (8)$$

$$X_L = |Z_1| \times \sin(\varphi) \quad (9)$$

Sendo:

R : valor de resistência da carga linear (Ω);

Z_1 : módulo da impedância equivalente (Ω);

φ : valor do ângulo entre as componentes fundamentais de tensão e corrente ($^\circ$);

X_L : valor da reatância indutiva da carga linear (Ω).

Com base no valor do fator de deslocamento, é possível determinar o ângulo de deslocamento entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, conforme a Equação 10.

$$\varphi = \cos^{-1} (F_{dest}) \quad (10)$$

φ : valor do ângulo entre as componentes fundamentais de tensão e corrente (°);

F_{dest} : fator de deslocamento.

Por fim, podemos determinar o valor da indutância da carga linear, a partir da Equação 11.

$$L = \frac{X_L}{2 \times \pi \times f} \quad (11)$$

Sendo:

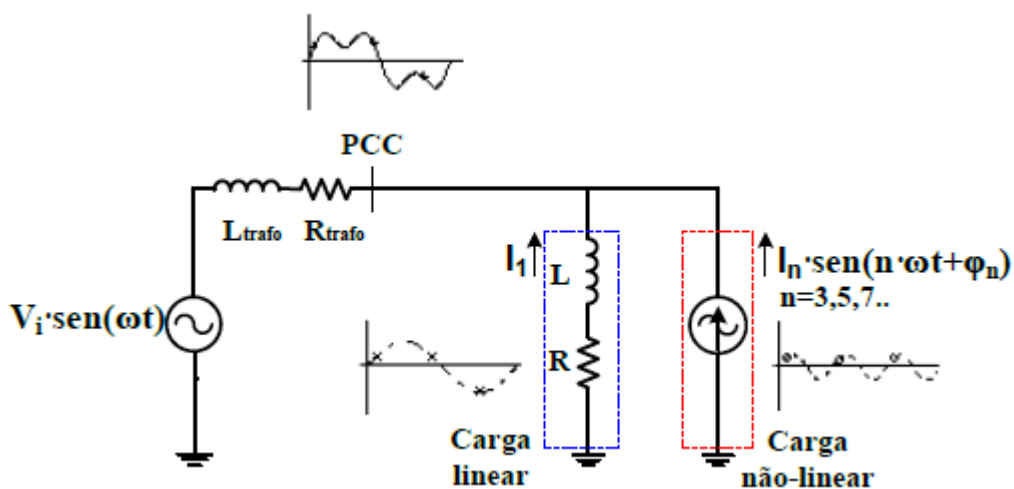
L : valor de indutância da carga linear (H);

X_L : valor da reatância indutiva da carga linear (Ω);

f : frequência da rede de alimentação (Hz).

As cargas não-lineares também devem ser modeladas, de acordo com Dugan (2003), a análise de sistemas em regime permanente, quando há presença de cargas não lineares, pode ser abordada utilizando técnicas de solução de circuitos lineares. Nesse contexto, é possível considerar a inclusão de fontes harmônicas lineares, que podem assumir a forma de fontes de corrente ou fontes de tensão. Essas fontes harmônicas são utilizadas para representar as distorções causadas pelas cargas não lineares e permitem uma análise mais precisa do sistema. A Figura 11 apresenta o modelo utilizando fontes de corrente.

Figura 11 – Modelo por fontes de corrente



Fonte: Oliveira (2010).

A seleção de um *software* apropriado para a simulação de circuitos elétricos é de suma importância. O *software* escolhido deve ser capaz de simular a instalação elétrica completa do Câmpus, levando em consideração todos os elementos presentes. Por meio dessa simulação, foi possível validar a modelagem da planta elétrica realizada, bem como avaliar a eficácia dos filtros implementados. Neste estudo, será utilizado o *software* PSIM, desenvolvido pela Powersim.

Após a obtenção dos resultados da simulação, será realizada uma validação dos dados obtidos com o objetivo de avaliar se a modelagem da planta elétrica está de acordo com a instalação presente no campus, comparando os valores medidos com os valores simulados.

Com os dados validados, uma comparação é realizada entre os dados obtidos nos trabalhos realizados pelos autores Teodoro (2019) e Dantas (2019), em que foram utilizados dados obtidos na subestação em 2018. O objetivo desta comparação é avaliar se, ao longo destes cinco anos, houve uma alteração significativa na carga da instituição que modificou os níveis de distorção harmônica. A partir disso, é feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos e os limites estabelecidos pelas normas pertinentes é realizada, verificando se os valores de distorção harmônica estão violando estes limites.

Se a correção for necessária, o filtro é então dimensionado e inserido na planta. Optou-se pela utilização do filtro passivo *shunt* pois são eficazes para atenuar a frequência específica à qual foi sintonizado, possui menor custo de implementação

e sua instalação é relativamente simples. Para o dimensionamento dos componentes do filtro primeiramente determinamos o fator de deslocamento da instalação. De acordo com Kassick (2016), o valor de capacitância do banco de capacitores do filtro *shunt* está relacionada diretamente à correção do fator de deslocamento da instalação elétrica. Dessa forma, calcula-se o fator de deslocamento conforme a Equação 11.

$$F_{desl} = \frac{FP}{F_{dist_i} \times F_{dist_v}} \quad (12)$$

Sendo:

F_{desl} : fator de deslocamento;

FP : fator de potência;

F_{dist_i} : fator de distorção de corrente

F_{dist_v} : fator de distorção de tensão.

Os fatores de distorção de corrente e de tensão são calculados a partir das Equações 12 e 13, respectivamente.

$$F_{dist_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (13)$$

Sendo:

F_{dist_i} : fator de distorção de corrente;

THD_i : taxa de distorção total de corrente.

$$F_{dist_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2}} \quad (14)$$

Sendo:

F_{dist_v} : fator de distorção de tensão;

THD_v : taxa de distorção total de tensão.

Com base no valor do fator de deslocamento, é possível determinar o ângulo de deslocamento entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, conforme a Equação 14.

$$\varphi = \cos^{-1} (F_{desl}) \quad (15)$$

φ : valor ângulo da corrente da componente fundamental ($^\circ$);

F_{desl} : fator de deslocamento.

De acordo com Oliveira (2010), para corrigir o fator de deslocamento para um valor unitário, o valor da potência reativa por fase fornecida pelos capacitores do filtro (Q_{cap}) deve ser igual ao valor da potência fornecida reativa de deslocamento (Q_{desl}). Estes valores são definidos pelas Equações 15 e 16.

$$Q_{desl} = V_{ef_1} \times I_{ef_1} \times \text{sen}(\varphi) \quad (16)$$

$$Q_{cap} = V_{ef_1}^2 \times 2 \times \pi \times f \times C_{sh} \quad (17)$$

Sendo:

Q_{desl} : potência reativa de deslocamento (VAr).

Q_{cap} : potência reativa monofásica fornecida pelo capacitor (VAr);

C_{sh} : valor da capacitância por fase do filtro (F);

V_{ef_1} : valor eficaz da tensão de fase-neutro da componente fundamental (V);

I_{ef_1} : valor eficaz da corrente da componente fundamental (A);

f : frequência da rede de alimentação (Hz);

Substituindo (15) em (16), obtemos a partir da Equação 17 o valor da capacitância por fase do filtro (C_{sh}).

$$C_{sh} = \frac{I_{ef_1} \times \sin(\varphi)}{V_{ef_1}^2 \times 2 \times \pi \times f} \quad (18)$$

Sendo:

C_{sh} : valor da capacitância por fase do filtro (F).

Conforme Oliveira (2010), após definir a capacitância por fase (C_{sh}), é necessário dimensionar o reator trifásico de modo que ele sintonize o filtro *shunt* na frequência de ressonância desejada. A Equação 18 apresenta o cálculo da indutância do reator (L_{sh}) a ser inserido no filtro.

$$L_{sh} = \frac{1}{(2 \times \pi \times h \times f)^2 \times C_{sh}} \quad (19)$$

Sendo:

L_{sh} : indutância do filtro *shunt* (H);

h : ordem harmônica;

f : frequência da rede de alimentação (Hz);

C_{sh} : valor da capacitância por fase do filtro (F).

A partir do valor de indutância do filtro *shunt* LC e do fator de qualidade do filtro, podemos determinar o valor da resistência do filtro *shunt* (R_{sh}) (OLIVEIRA, 2010). A Equação 19 apresenta como este valor é definido.

$$R_{sh} = \frac{2 \times \pi \times f \times h \times L_{sh}}{3} \quad (20)$$

Sendo:

R_{sh} : resistência de cada fase do filtro *shunt* (Ω);

L_{sh} : indutância do filtro *shunt* (H);

h : ordem harmônica;

f : frequência da rede de alimentação (Hz).

Assim, todos os elementos presentes na configuração do filtro *shunt* LC estão dimensionados, possibilitando a inserção do filtro na planta. Após a inserção, a simulação é realizada novamente, verificando os valores e os comparando com os limites normativos, a fim de avaliar a eficácia da correção das distorções harmônicas.

Com os resultados obtidos dentro dos limites normativos, faz-se uma comparação entre os dados obtidos no ano de 2018 e os estudos realizados com os dados deste ano. O objetivo dessa comparação é avaliar se, ao longo desses cinco anos, houve alteração significativa na carga da instituição que tenha modificado os níveis de distorção harmônica. Por meio dessa análise, é possível verificar se as medidas de correção adotadas para a minimização das distorções nos trabalhos anteriores continuam eficazes diante de possíveis alterações na instalação ao longo dos anos.

4 ESTUDO DE CASO

Conforme já exposto, o estudo de caso está baseado nos dados medidos no lado de baixa tensão da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis, com o objetivo de avaliar as distorções harmônicas presentes na instalação. Com base nesses resultados, será projetado um filtro passivo para a correção das distorções, visando à melhoria da qualidade da energia fornecida à instituição.

4.1 MODELAGEM DA PLANTA

Primeiramente, iremos definir as características dos alimentadores. No Capítulo 2, foram descritas as características da instalação fornecidas pela concessionária. A partir dessas informações, os dados da impedância acumulada no ponto de conexão e da impedância de base do sistema são obtidos. A partir desses dados, podem ser calculadas a resistência e a reatância indutiva do alimentador por meio das Equações 20 e 21.

$$R_{alim} = R_1 \times Z_{base} \quad (21)$$

Sendo:

R_{alim} : resistência do alimentador (Ω);

R_1 : resistência acumulada no ponto de conexão (pu);

Z_{base} : impedância de base do sistema no ponto de conexão (Ω).

$$X_{alim} = X_1 \times Z_{base} \quad (22)$$

Sendo:

X_{alim} : reatância do alimentador (Ω);

X_1 : reatância acumulada no ponto de conexão (pu);

Z_{base} : impedância de base do sistema no ponto de conexão (Ω).

Com o valor da reatância do alimentador, é possível calcular a indutância do alimentador a partir da Equação 22.

$$L_{alim} = \frac{X_{alim}}{2 \times \pi \times f} \quad (23)$$

Sendo:

L_{alim} : indutância do alimentador (H);

X_{alim} : reatância do alimentador (Ω);

f : frequência da rede de alimentação (Hz).

A Tabela 3 apresenta as especificações do alimentador da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis

Tabela 3 – Especificações do alimentador

Especificação	Valor calculado
R_{alim}	0,619 Ω
L_{alim}	0,005521 H
X_{alim}	2,082 Ω

Fonte: Elaboração própria (2025).

Por meio de visita ao local, verificou-se que a subestação conta com quatro transformadores e quatro quadros gerais de baixa tensão. Contudo, constatou-se que o transformador trifásico a óleo do QGBT-1 está desativado e, portanto, não fará parte do estudo. Os demais transformadores dos QGBT-2, QGBT-3 e QGBT-4 são trifásicos a seco, com potência de 500 kVA cada. As características dos transformadores foram obtidas por meio dos dados de placa, onde se verificou que o transformador do QGBT-2 possui impedância de 5,83%, ligação em Delta/Estrela e tensão nominal de 13,8/0,38 kV. Os transformadores dos QGBT-3 e QGBT-4 são idênticos, com impedância de 7,30%, ligação em Delta/Estrela e tensão nominal de 13,8/0,38 kV.

Além disso, todos os transformadores estão conectados na topologia Dyn1, o que significa que o enrolamento do lado primário está conectado em Delta, o enrolamento do lado secundário está conectado em estrela com neutro acessível e a tensão do secundário está atrasada em 30° em relação à tensão do primário (MOSER; GONÇALVES, 2010).

Os dados de placa dos transformadores informam também que os equipamentos foram fabricados atendendo à norma NBR 10295, porém esta norma foi cancelada e substituída pela NBR 5356. Para a modelagem dos transformadores presentes na subestação, foi considerada a parte 11 da NBR 5356, que trata das especificações de transformadores do tipo seco.

Conforme a NBR 5356 (ABNT, 2016), para transformadores trifásicos com tensão máxima de 15 kV e potência nominal de 500 kVA, considerando o nível de eficiência D (o menor nível de eficiência), temos as seguintes especificações:

- perdas em vazio: 1800 W;
- perdas totais: 9000W;
- rendimento: 98,45%;
- corrente de excitação: 1,8%;

- tensão de curto circuito: 5,5%.

A partir dos valores de perdas totais e perdas em vazio, as perdas no cobre por fase podem ser calculadas, conforme a Equação 23.

$$P_{cobre} = \frac{(P_{totais} - P_{vazio})}{3} \quad (24)$$

Sendo:

P_{cobre} : perdas no cobre por fase (W);

P_{totais} : perdas totais, conforme NBR 5356-11 (W);

P_{vazio} : perdas em vazio, conforme NBR 5356-11 (W).

Calcula-se a então resistência (R_{trafo}) e a indutância (L_{trafo}) dos transformadores no enrolamento de baixa tensão conforme as Equações 25 e 27, respectivamente. O valor de impedância (Z_{trafo}) do transformador é calculado conforme a Equação 24 e o valor de reatância do transformador (X_{trafo}) conforme a Equação 26.

$$Z_{trafo} = \frac{V_L^2}{S_{trafo}} \times Z_{\%} \quad (25)$$

Sendo:

Z_{trafo} : impedância do transformador (Ω);

V_L : tensão de linha (V);

S_{trafo} : potência trifásica nominal do transformador (VA);

$Z_{\%}$: impedância percentual do transformado.

$$R_{trafo} = \frac{P_{cobre}}{I_n^2} \quad (26)$$

Sendo:

R_{trafo} : resistência do transformador (Ω);

P_{cobre} : perdas no cobre (W);

I_n : corrente nominal no enrolamento de baixa tensão do transformador (A).

$$X_{trafo} = \sqrt{Z_{trafo}^2 - R_{trafo}^2} \quad (27)$$

Sendo:

X_{trafo} : reatância do transformador (Ω);

Z_{trafo} : impedância do transformador (Ω);

R_{trafo} : resistência do transformador (Ω).

$$L_{trafo} = \frac{X_{trafo}}{2 \times \pi \times f} \quad (28)$$

Sendo:

L_{trafo} : indutância do transformador (Ω);

X_{trafo} : reatância do transformador (Ω);

f : frequência da rede de alimentação (Hz).

A Tabela 4 apresenta os valores calculados para os transformadores conectados aos QGBT-02, 03 e 04.

Tabela 4 – Características elétricas dos transformadores

	QGBT-02	QGBT-03	QGBT-04
Resistência (m Ω)	4,159	4,159	4,159
Indutância ($\mu\Omega$)	43,277	54,824	54,824
Impedância (m Ω)	16,837	21,082	21,082
Reatância (m Ω)	16,315	20,668	20,668

Fonte: Elaboração própria (2025).

A modelagem da planta elétrica foi realizada considerando dois cenários: sistema trifásico equilibrado e sistema trifásico real. A modelagem abrange as cargas lineares e não lineares, conforme apresentado no capítulo 3, com o objetivo de representar de forma precisa o comportamento elétrico em ambos os cenários.

4.1.1 Sistema trifásico equilibrado

O sistema trifásico equilibrado considera que as cargas e tensões estão igualmente distribuídas entre as fases. A partir dos valores das medições, foi realizado um tratamento dos dados, no qual se obteve o percentil de 95% para cada conjunto de dados e, em seguida, calculada a média aritmética entre esses valores para cada fase dos três QGBTs.

A corrente demandada e a tensão eficaz na frequência fundamental de cada QGBT no sistema equilibrado foram calculadas a partir da média aritmética dos valores dos percentis de 95% de cada conjunto de dados das três fases dos QGBTs.

Os valores de taxas de distorção harmônica de tensão e de corrente foram determinados a partir dos percentis de 95% de cada valor de corrente e tensão das componentes múltiplas da fundamental para cada QGBT conforme apresentado na Equação 1. Para o sistema equilibrado, foi calculada a média aritmética entre os valores de cada fase dos respectivos QGBTs.

Os valores de potência aparente e fator de potência foram calculados a partir da média aritmética dos valores dos percentis de 95% de cada conjunto de dados das três fases dos QGBTs. A potência ativa foi calculada por meio dos valores de potência aparente e fator de potência e, em seguida, foi realizada a média aritmética dos valores obtidos de potência ativa para cada fase de cada QGBT.

A Tabela 5 apresenta os dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema equilibrado.

Tabela 5 – Dados obtidos e tratados das medições nos QGBTs para o sistema equilibrado

QGBT	Fase	V_{ef} (V)	I_{ef} (A)	FP	THDi (%)	THDv (%)	P (kW)	S (kVA)
2	R	233,640	249,839	0,984	5,606	4,471	55,945	56,843
	S	233,640	249,839	0,984	5,606	4,471	55,945	56,843
	T	233,640	249,839	0,984	5,606	4,471	55,945	56,843
3	R	233,499	209,695	0,989	7,297	4,518	39,490	39,951
	S	233,499	209,695	0,989	7,297	4,518	39,490	39,951
	T	233,499	209,695	0,989	7,297	4,518	39,490	39,951
4	R	233,525	374,076	0,993	6,912	4,088	87,512	88,151
	S	233,525	374,076	0,993	6,912	4,088	87,512	88,151
	T	233,525	374,076	0,993	6,912	4,088	87,512	88,151

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados tratados das medições realizadas na subestação em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 6 – Dados tratados das medições realizadas na subestação em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019 para o sistema equilibrado

QGBT	Fase	$V_{I_{ef}}$ (V)	$I_{I_{ef}}$ (A)	FP	THDi (%)	THDv (%)	S (kVA)	P (kW)
2	R	229,35	236,91	0,95	6,04	2,82	53,28	50,89
	S	229,35	236,91	0,95	6,04	2,82	53,28	50,89
	T	229,35	236,91	0,95	6,04	2,82	53,28	50,89
3	R	229,48	159,03	0,98	8,68	1,69	36,60	36,17
	S	229,48	159,03	0,98	8,68	1,69	36,60	36,17
	T	229,48	159,03	0,98	8,68	1,69	36,60	36,17
4	R	227,14	385,76	0,98	11,51	2,23	92,06	89,82
	S	227,14	385,76	0,98	11,51	2,23	92,06	89,82
	T	227,14	385,76	0,98	11,51	2,23	92,06	89,82

Fonte: Teodoro (2019).

A Tabela 7 apresenta a variação percentual das grandezas elétricas medidas nos QGBTs entre os anos de 2018 e 2023.

Tabela 7 – Variação percentual das grandezas elétricas nos QGBTs entre 2018 e 2023

QGBT	Fase	ΔV_{ef} (%)	ΔI_{ef} (%)	ΔF_P (%)	ΔTHD_i (%)	ΔTHD_v (%)	ΔP (%)	ΔS (%)
2	R	1,871	5,457	3,579	7,185	58,546	9,933	11,698
	S	1,871	5,457	3,579	7,185	58,546	9,933	11,698
	T	1,871	5,457	3,579	7,185	58,546	9,933	11,698
3	R	1,751	31,859	0,918	15,933	167,337	9,179	10,453
	S	1,751	31,859	0,918	15,933	167,337	9,179	10,453
	T	1,751	31,859	0,918	15,933	167,337	9,179	10,453
4	R	2,811	3,029	1,327	39,948	83,318	2,570	1,858
	S	2,811	3,029	1,327	39,948	83,318	2,570	1,858
	T	2,811	3,029	1,327	39,948	83,318	2,570	1,858

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que os valores de tensão não tiveram grandes alterações; no entanto, os valores de corrente do QGBT-3 apresentaram um aumento expressivo em comparação a 2018. As taxas de distorção total, tanto de corrente quanto de tensão, também apresentaram alterações significativas. Nota-se que, em 2018, os valores das taxas de distorção de corrente eram inferiores nos QGBT-2 e QGBT-3, já no QGBT-4 a taxa de distorção de corrente era maior em 2018 em comparação a 2023. Os valores de potência tiveram pequenas alterações ao longo dos anos, sendo que em 2018 os valores eram inferiores em todos os QGBTs. O aumento nos valores de corrente do QGBT-3 pode estar relacionado a uma maior demanda de carga. Em relação às taxas de distorção total de corrente e tensão, essas variações também podem ser consequência de alterações no perfil de carga da instalação ao longo do tempo.

A Tabela 8 apresenta os valores de fator de distorção de corrente (F_{disti}), fator de distorção de tensão (F_{distv}) e fator de deslocamento (F_{desl}) de cada fase dos respectivos QGBTs, calculados por meio das Equações 11, 12 e 13

Tabela 8 – Valores obtidos de F_{disti} , F_{distv} e F_{desl} para planta equilibrada

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
F_{disti}	0,998	0,998	0,998	0,997	0,997	0,997	0,998	0,998	0,998
F_{distv}	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
F_{desl}	0,987	0,987	0,987	0,992	0,992	0,992	0,996	0,996	0,996

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os QGBT-3 e QGBT-4 possuem bancos capacitivos conectados em delta. Para determinar as cargas lineares do tipo RL, é necessário estimar a potência reativa injetada pelos bancos. Esses bancos são compostos por seis estágios, sendo quatro

estágios formados por três unidades capacitivas de 91,84 μF (equivalentes a 5 kVAr cada) e dois estágios com capacitores de 45,92 μF (equivalentes a 2,5 kVAr cada).

Conforme indicado pelo termo de referência (IFSC, 2009, apud TEODORO, 2019), cada banco capacitivo possui potência reativa de 75 kVAr, assim a potência reativa máxima por fase é de 25 kVAr, o que permite a utilização de até duas unidades de 2,5 kVAr e quatro unidades de 5 kVAr por fase.

A Tabela 7 apresenta os valores do fator de deslocamento para cada fase de cada QGBT, considerando a existência de um banco capacitivo e uma carga linear RL, que deve ser modelada de acordo com o ângulo de deslocamento proveniente dessas duas cargas em paralelo. Considera-se que o banco capacitivo está conectado entre duas fases (conexão), enquanto a carga RL está conectada entre fase e neutro.

Considerando uma operação equilibrada nas três fases, os fatores de deslocamento médios foram de 0,992 para o QGBT-3 e 0,996 para o QGBT-4. Isso indica que, para o QGBT-3 e o QGBT-4, após a adição de 15 kVAr e 22,5 kVAr dos bancos capacitivos para cada QGBT, o fator de deslocamento foi ajustado para os valores finais destacados na tabela. Assim, foi determinado que, para o QGBT-3, será utilizada uma unidade capacitiva de 91,84 μF (5 kVAr) por fase, enquanto para o QGBT-4 serão utilizadas unidades capacitivas de 91,84 μF (5 kVAr) e 45,92 μF (2,5 kVAr) por fase.

Com a determinação destes valores, foi calculado o ângulo da corrente da componente fundamental antes da correção feita pelo banco de capacitores. Com o valor do ângulo e utilizando as Equações 8 e 10, é possível realizar a modelagem das cargas lineares do tipo RL dos QGBTs, conforme os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
$Z (m\Omega)$	935,162	935,162	935,162	1113,514	1113,514	1113,514	624,270	624,270	624,270
$Rl (m\Omega)$	922,878	922,878	922,878	1078,851	1078,851	1078,851	613,844	613,844	613,844
$Ll (\mu H)$	400,747	400,747	400,747	731,240	731,240	731,240	301,366	301,366	301,366
Ângulo (°)	9,297	9,297	9,297	14,334	14,334	14,334	10,486	10,486	10,486

Fonte: Elaboração própria (2025).

Para modelar as cargas não lineares, foram utilizadas fontes de corrente, nas quais foram incorporadas as correntes harmônicas de ordem ímpar medidas, conectadas em paralelo à carga RL. No sistema equilibrado, as amplitudes dessas correntes foram determinadas pela média aritmética dos valores percentis de 95% de cada conjunto de dados para as três fases de cada QGBT. A Tabela 10 apresenta esses valores.

Tabela 10 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema equilibrado

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	1 ^a	249,839	249,839	249,839	209,695	209,695	209,695	374,076	374,076	374,076
	3 ^a	11,215	15,595	10,905	12,571	9,382	11,813	26,004	23,245	18,039
	5 ^a	5,380	3,519	4,172	9,971	6,576	9,073	10,837	9,529	8,218
	7 ^a	2,324	2,450	2,294	6,326	4,380	2,226	6,579	5,476	5,430
	9 ^a	1,792	2,163	2,019	1,798	1,246	1,653	3,765	3,099	2,686
	11 ^a	0,873	1,045	1,031	1,041	0,881	0,804	2,512	1,610	1,717
	13 ^a	1,377	0,462	0,898	2,055	1,379	0,927	2,295	1,245	2,780
	15 ^a	0,735	0,845	0,870	0,830	0,878	0,651	1,278	0,974	2,382
	17 ^a	0,395	0,295	0,284	0,576	0,711	0,370	0,991	0,907	0,746
	19 ^a	0,340	0,502	0,310	0,311	0,414	0,317	0,575	0,530	1,0421
	21 ^o	0,309	0,339	0,0112	0,344	0,292	0,206	0,263	0,274	0,153
	23 ^a	0,286	0,213	0,00860	0,276	0,159	0,262	0,278	0,272	0,000
	25 ^a	0,00195	0,360	0,315	0,000717	0,288	0,289	0,000	0,283	0,251

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos da amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares, também considerando o sistema equilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 11 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema equilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1ª	236,78	236,76	236,74	159,66	159,64	159,62	402,54	402,51	402,47
3ª	13,60	13,66	13,64	11,79	11,83	11,82	37,56	37,67	37,64
5ª	4,62	4,63	4,65	8,10	8,10	8,11	16,06	16,07	16,09
7ª	1,41	1,41	1,41	2,51	2,51	2,51	11,39	11,38	11,38
9ª	1,64	1,65	1,65	0,73	0,74	0,73	4,06	4,05	4,04
11ª	1,01	1,01	1,01	0,56	0,56	0,56	8,52	8,53	8,52
13ª	0,55	0,55	0,55	1,24	1,24	1,24	2,28	2,27	2,27
15ª	0,48	0,49	0,48	0,25	0,25	0,25	1,07	1,10	1,09

Fonte: Teodoro (2019).

Em 2023, os valores da 1ª harmônica são superiores aos de 2018 em quase todos os QGBTs e fases, indicando um aumento da carga elétrica no sistema. No QGBT-04, houve uma leve redução da corrente fundamental na fase R, passando de 402,54 A para 374,076 A, o que pode indicar mudanças na carga conectada a esse quadro. Analisando as harmônicas de ordem superior, a maioria das componentes harmônicas apresentou aumento de 2018 para 2023, indicando um crescimento na distorção harmônica da corrente.

4.1.1.1 Análise e validação da modelagem da planta equilibrada

Para validação da modelagem da planta equilibrada, foi realizada uma comparação entre os valores medidos na planta real e os resultados obtidos por meio da simulação, com o objetivo de verificar se os desvios entre os dados reais e simulados estão dentro de limites aceitáveis. Para isso, foram calculados os erros absolutos, permitindo uma análise de forma quantitativa a precisão da modelagem. Em seguida, foram apresentados os valores resultantes da simulação, permitindo uma avaliação detalhada da aderência do modelo à realidade.

A Tabela 12 apresenta os valores das grandezas obtidos pela simulação da planta equilibrada modelada.

Tabela 12 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta equilibrada

QGBT	Fase	V_{ef1} (V)	I_{ef1} (A)	FP	THDi (%)	P (kW)	S (kVA)
2	R	235,315	251,629	0,985	5,371	58,434	59,295
	S	235,315	251,629	0,985	5,371	58,434	59,295
	T	235,315	251,629	0,985	5,371	58,434	59,295
3	R	235,578	206,868	0,988	7,477	48,288	48,869
	S	235,578	206,868	0,988	7,477	48,288	48,869
	T	235,578	206,868	0,988	7,477	48,288	48,869
4	R	234,728	371,091	0,994	7,091	86,780	87,337
	S	234,728	371,091	0,994	7,091	86,780	87,337
	T	234,728	371,091	0,994	7,091	86,780	87,337

Fonte: Elaboração própria (2025).

Para registro, a Tabela 13 apresenta os valores de erro relativo obtidos na comparação entre os valores medidos e simulados para a planta equilibrada.

Tabela 13 – Valores de erro relativo obtidos entre os valores medidos e valores simulados

QGBT	Grandeza	Erro Fase R (%)	Erro Fase S (%)	Erro Fase T (%)
2	V_{ef1} (V)	0,717	0,717	0,717
	I_{ef1} (A)	0,717	0,717	0,717
	FP	0,116	0,116	0,116
	THDi (%)	4,200	4,200	4,200
	P (kW)	4,449	4,449	4,449
	S (kVA)	4,314	4,314	4,314
3	V_{ef1} (V)	0,890	0,890	0,890
	I_{ef1} (A)	1,348	1,348	1,348
	FP	0,044	0,044	0,044
	THDi (%)	2,476	2,476	2,476
	P (kW)	21,625	21,625	21,625
	S (kVA)	22,324	22,324	22,324
4	V_{ef1} (V)	0,515	0,515	0,515
	I_{ef1} (A)	0,798	0,798	0,798
	FP	0,100	0,100	0,100
	THDi (%)	2,598	2,598	2,598
	P (kW)	0,837	0,837	0,837
	S (kVA)	0,924	0,924	0,924

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que todos os valores apresentaram erros inferiores a 5%, exceto para as potências ativa e aparente do QGBT-3. Contudo, ao calcular essas

potências a partir das tensões e correntes eficazes medidas, os resultados obtidos são muito próximos aos valores simulados. Isso indica que a aplicação do percentil 95% pode ter excluído alguns dados relevantes, impactando os valores de potência. Assim, podemos concluir que a modelagem da planta está em conformidade com a instalação real.

Com o modelo proposto validado, podemos avançar para a análise dos resultados. A planta modelada utilizada para a simulação está apresentada no Apêndice A.

A Tabela 14 apresenta os valores das grandezas obtidos pela simulação da planta equilibrada modelada, baseado nos dados de medições obtidos em 2018 na subestação.

Tabela 14 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta equilibrada com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019

QGBT	Fase	FP	THD_i (%)	V_{sef} (V)	I_{sef} (A)
2	R	0,95	6,24	229,24	237,23
	S	0,95	6,13	229,20	237,22
	T	0,95	6,16	229,20	237,19
3	R	0,95	9,23	229,67	160,32
	S	0,95	9,13	229,64	160,31
	T	0,95	9,15	229,63	160,29
4	R	0,94	10,89	227,03	404,89
	S	0,94	10,79	227,00	404,87
	T	0,94	10,81	227,00	404,83

Fonte: Teodoro (2019).

A Tabela 15 apresenta a variação percentual das grandezas elétricas obtidos via simulação da planta equilibrada entre os anos de 2018 e 2023.

Tabela 15 - Variação percentual das grandezas elétricas obtidos via simulação da planta equilibrada entre os anos de 2018 e 2023

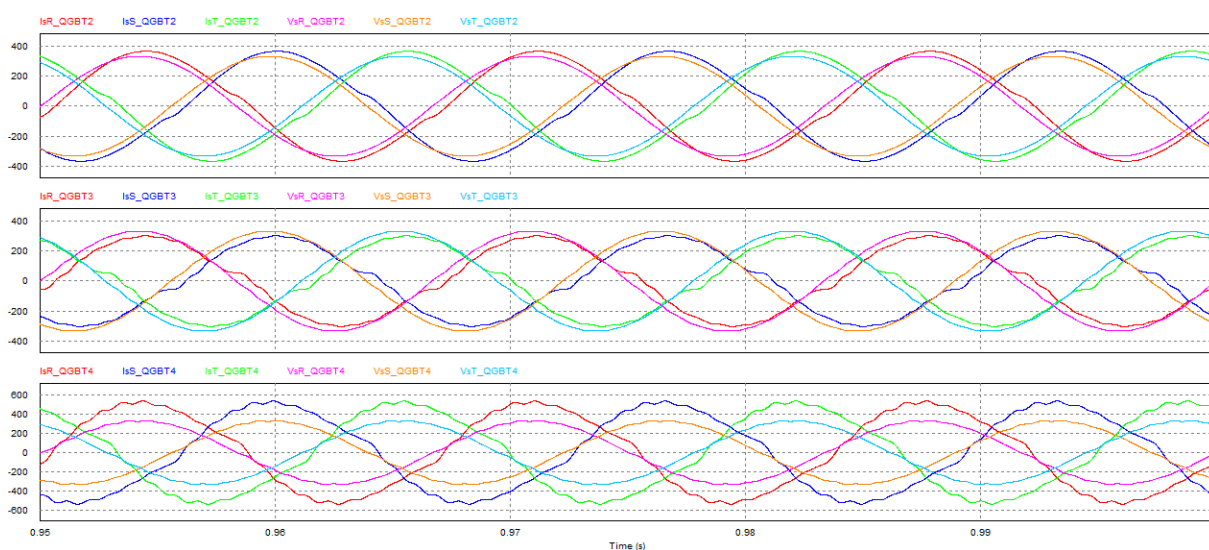
QGBT	Fase	ΔV_{ef1} (%)	ΔI_{ef1} (%)	ΔF_P (%)	$\Delta THDi$ (%)
2	R	2,650	6,070	3,684	13,926
	S	2,668	6,074	3,684	12,382
	T	2,668	6,088	3,684	12,808
3	R	2,572	29,034	4,000	18,992
	S	2,586	29,042	4,000	18,105
	T	2,590	29,059	4,000	18,284
4	R	3,391	8,348	5,745	34,885
	S	3,404	8,343	5,745	34,282
	T	3,404	8,334	5,745	34,403

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que os valores de tensão tiveram pequenas alterações entre os anos de 2018 e 2023 para todos os QGBTs. O QGBT-3 apresentou um aumento significativo nos valores de corrente em 2023 em relação ao ano de 2018, provavelmente causado por um aumento na demanda deste quadro. Os valores de THDi apresentaram diminuição em 2023, ao comparar ao ano de 2018, a possível causa é uma mudança no perfil das cargas da instalação, causando uma diminuição na taxa de distorção harmônica de corrente.

A Figura 12 apresenta os resultados de simulação para as componentes de corrente e tensão vistas pelo alimentador em cada fase de cada QGBT.

Figura 12 – Corrente e tensão vistas pelo alimentador nas fases R, S e T de cada QGBT

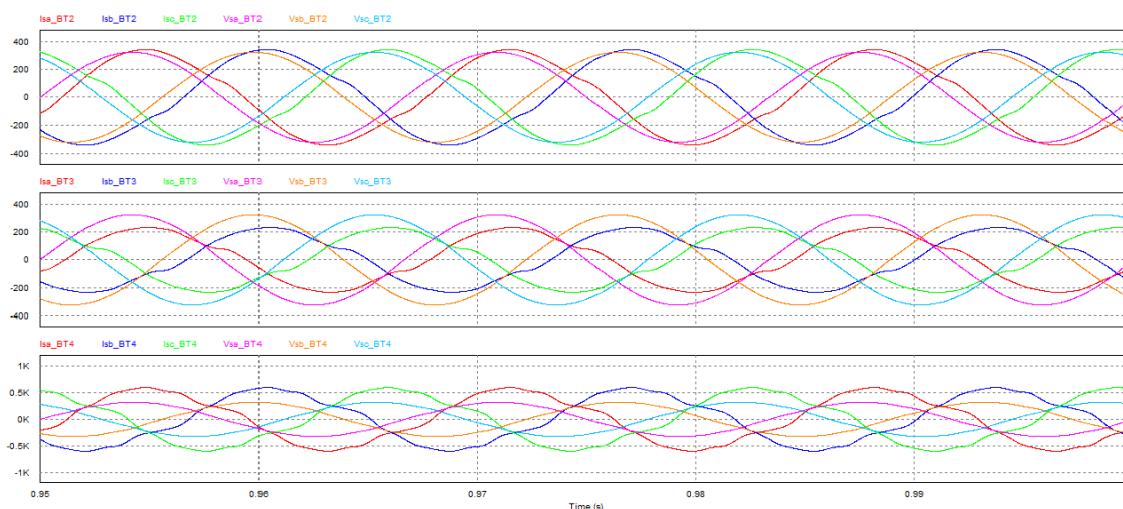


Fonte: Elaboração própria (2025).

Nota-se que as formas de onda de corrente e tensão das fases do QGBT-2 são quase senoidais, sem distorções aparentes ou variações significativas nas amplitudes, indicando ausência de harmônicas significativas. O QGBT-3 apresenta pequenas distorções nas formas de onda de corrente, enquanto a forma de onda de tensão é quase senoidal. Já o QGBT-4 apresenta distorções mais evidentes nas formas de onda de corrente, indicando distorções harmônicas relevantes e embora a forma de onda de tensão esteja próxima a ser senoidal, apresenta pequenas variações, possivelmente refletindo a influência da carga distorcida presente na instalação.

A Figura 13 apresenta as componentes de corrente e tensão vistas pelo alimentador em cada fase de cada QGBT que foram obtidas com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 13 – Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019



Fonte: Teodoro (2019).

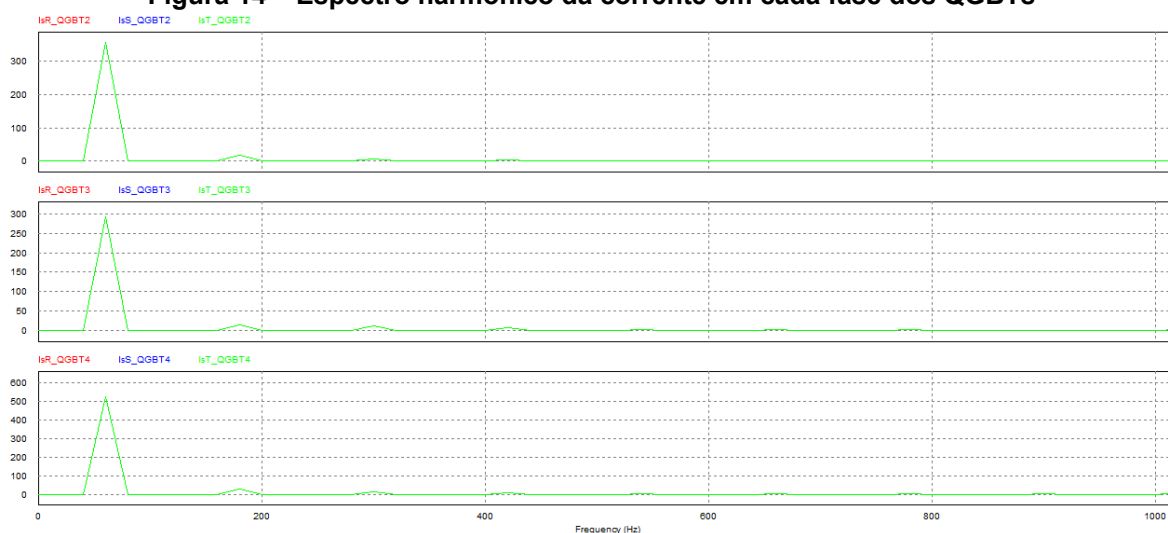
Comparando as formas de onda de tensão e corrente das Figuras 12 e 13, observa-se que as formas de onda do QGBT-2 permaneceram praticamente inalteradas ao longo desses cinco anos. No entanto, as formas de onda de tensão e corrente do QGBT-3 e QGBT-4 apresentam um aumento perceptível nas distorções, indicando uma possível intensificação das cargas não lineares ou alterações no perfil de consumo da instalação.

Apesar de as formas de onda do ano de 2023 possuírem visivelmente maior distorção nas formas de onda de corrente, os valores de THDi deste ano são menores do que os valores do ano de 2018, conforme apresentado nas Tabelas 12 e 14. Como a THDi é calculada pela razão entre a soma das componentes harmônicas e a componente fundamental, um aumento na corrente fundamental pode reduzir o valor percentual da THDi, mesmo que as harmônicas absolutas tenham aumentado, ou seja, embora as formas de onda de 2023 aparentam maior distorção visualmente, os valores de THDi são menores, o que indica que a magnitude das correntes fundamentais do ano de 2023 podem estar maiores do que em 2018.

4.1.1.1.1 *Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs*

A análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente é fundamental para avaliar a qualidade de energia em cada QGBT. A Figura 14 apresenta o espectro harmônico da corrente das fases R, S e T de cada QGBT.

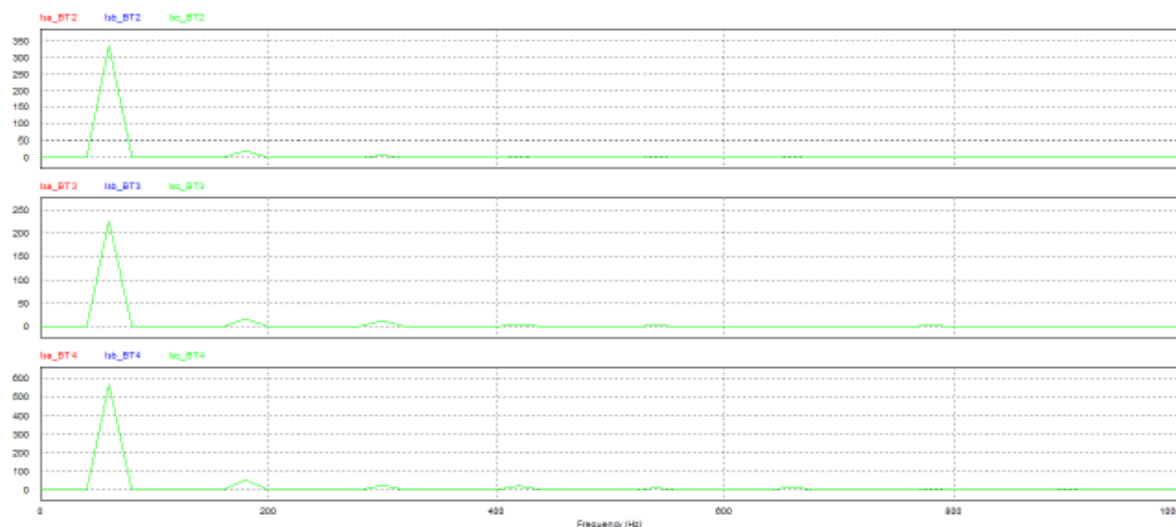
Figura 14 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 15 apresenta o espectro harmônico da corrente das fases R, S e T de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 15 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.



Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que não houve mudanças expressivas no espectro harmônico da corrente ao longo desses cinco anos. É notável que a 3ª e a 5ª harmônica apresentaram valores significativos tanto em 2018 quanto em 2023.

Para uma melhor análise, após a obtenção da FFT, foi realizada a verificação das amplitudes das correntes harmônicas de ordem ímpar em cada fase dos QGBTs, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta equilibrada

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	Fase	R	S	T	Fase	R
Componente harmônica de corrente	1ª	355,858	355,858	355,858	292,556	292,556	292,556	524,801	524,801	524,801
	3ª	17,283	17,375	17,352	15,395	15,476	15,457	30,150	30,224	30,177
	5ª	5,802	5,816	5,828	12,153	12,167	12,179	13,174	13,164	13,211
	7ª	3,067	3,076	3,074	6,457	6,458	6,456	8,526	8,545	8,521
	9ª	2,603	2,626	2,620	2,076	2,089	2,084	3,950	3,960	3,954
	11ª	1,243	1,245	1,250	1,689	1,692	1,699	3,706	3,696	3,718
	13ª	1,129	1,132	1,131	3,164	3,165	3,163	5,150	5,164	5,148
	15ª	1,056	1,066	1,064	1,038	1,046	1,039	1,884	1,877	1,877
	17ª	0,357	0,357	0,358	2,610	2,603	2,615	7,120	7,080	7,116
	19ª	0,453	0,455	0,452	2,926	2,924	2,916	10,052	10,072	10,063
	21ª	0,280	0,288	0,285	0,382	0,361	0,369	0,269	0,277	0,291
	23ª	0,232	0,230	0,233	2,469	2,477	2,478	0,372	0,373	0,359
	25ª	0,293	0,294	0,295	0,835	0,769	0,788	0,156	0,313	0,121

Fonte: Elaboração própria (2025).

Podemos observar que a harmônica de 3ª ordem apresenta valores elevados, especialmente no QGBT-4, o que indica a possível necessidade de correção de distorção harmônica para esse QGBT. Outro ponto a ser analisado são os valores elevados das harmônicas de 17ª e 19ª ordens nas três fases do QGBT-4.

Um dos possíveis fatores para isso ter ocorrido são presenças de cargas não lineares como inversores de frequência que são grandes fontes de harmônicas, principalmente em ordens altas como a 17ª e 19ª (DUGAN, 2003). Considerando que o QGBT-4 está conectado à geração fotovoltaica da instituição, podemos concluir que os inversores de frequência desempenham um papel significativo na contribuição para esses valores elevados, sendo uma das principais fontes das distorções harmônicas observadas.

A Tabela 17 apresenta os valores de amplitude das correntes harmônicas de ordens ímpares obtidos via simulação com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 17 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta equilibrada com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1ª	236,78	236,76	236,74	159,66	159,64	159,62	402,54	402,51	402,47
3ª	13,60	13,66	13,64	11,79	11,83	11,82	37,56	37,67	37,64
5ª	4,62	4,63	4,65	8,10	8,10	8,11	16,06	16,07	16,09
7ª	1,41	1,41	1,41	2,51	2,51	2,51	11,39	11,38	11,38
9ª	1,64	1,65	1,65	0,73	0,74	0,73	4,06	4,05	4,04
11ª	1,01	1,01	1,01	0,56	0,56	0,56	8,52	8,53	8,52
13ª	0,55	0,55	0,55	1,24	1,24	1,24	2,28	2,27	2,27
15ª	0,48	0,49	0,48	0,25	0,25	0,25	1,07	1,10	1,09

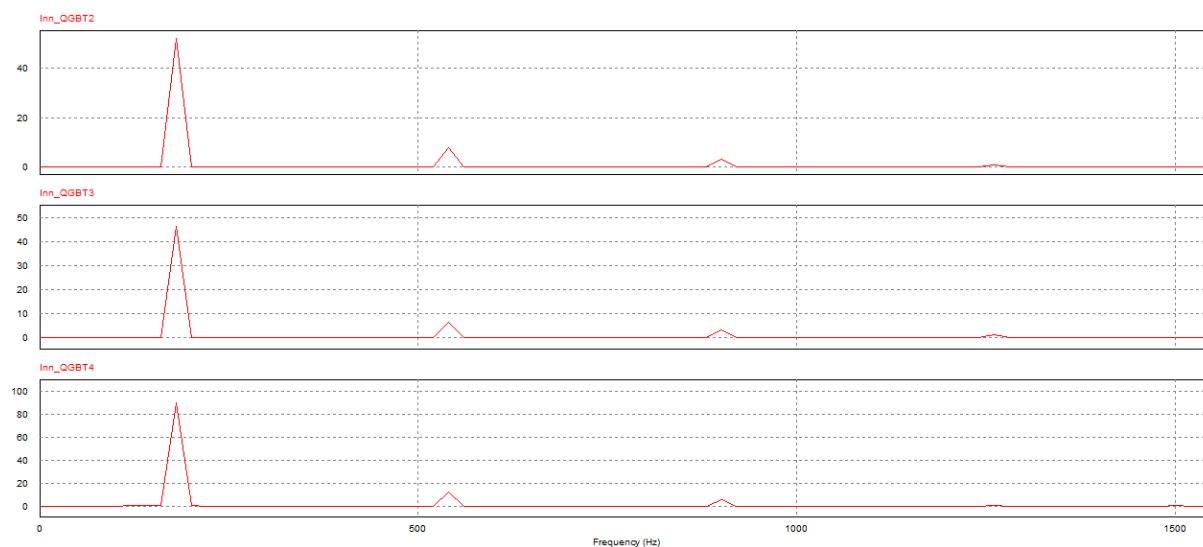
Fonte: Teodoro (2019).

Assim como observado nas amplitudes de 2023, a 3ª harmônica também apresentou valores elevados em 2018, especialmente no QGBT-4. Também é possível observar um aumento significativo na componente harmônica de 11ª ordem no QGBT-4. Segundo Teodoro (2019), isso ocorre devido à ressonância entre o banco de capacitores instalado e a impedância da fonte. No entanto, o estudo de 2018 demonstrou resultados apenas até a 15ª harmônica, o que impossibilita a análise dos níveis das harmônicas de 17ª e 19ª ordens neste ano.

4.1.1.1.2 Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs

A corrente no condutor neutro pode ser afetada significativamente pela presença de componentes harmônicas, principalmente as de ordem ímpar múltiplas de três. Por meio da simulação, foi obtido o espectro harmônico das componentes de corrente no condutor de neutro de cada QGBT, apresentado na Figura 16.

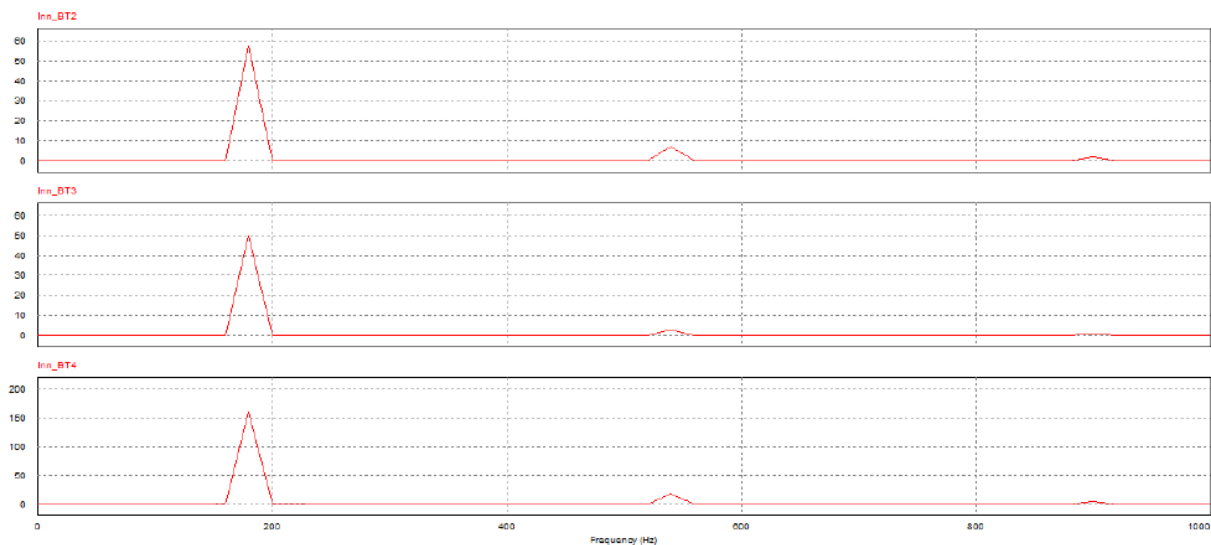
Figura 16 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 17 apresenta o espectro harmônico das componentes de corrente no condutor de neutro de cada QGBT, baseado nos dados obtidos em 2018.

Figura 17 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT, baseado nos dados obtidos em 2018



Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que o espectro harmônico da corrente no condutor neutro de cada QGBT permaneceu bastante semelhante entre os anos de 2018 e 2023, destacando-se o valor da amplitude de corrente da harmônica de 3ª ordem.

Para obter uma análise mais detalhada, foram obtidos os valores de amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT. A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos por meio de simulação.

Tabela 18 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT

Componente harmônica	QGBT-2	QGBT-3	QGBT-4
3ª	52,009	46,328	90,055
9ª	7,849	6,249	11,866
15ª	3,186	3,123	5,636
21ª	0,854	1,112	0,836

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos dos valores de amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 19 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT					
	2		3		4	
	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b
1 ^a	62,40	0,00	53,53	0,00	158,04	0,00
3 ^a	41,11	40,90	36,03	35,43	115,78	112,88
9 ^a	5,42	4,95	2,54	2,19	13,46	12,16
15 ^a	1,58	1,45	1,09	0,76	3,34	3,26
^a Valores das medições do sistema real;						
^b Valores das simulações do sistema equilibrado.						

Fonte: Teodoro (2019).

De acordo com Kassick (2016), em um sistema trifásico equilibrado, as componentes de corrente no neutro são eliminadas para as harmônicas de sequência positiva e negativa. No entanto, as harmônicas de ordem tripla em cada fase estão em fase entre si, resultando na soma de suas correntes no condutor de neutro.

Nota-se que a corrente do condutor de neutro de cada QGBT está diretamente relacionada à presença de harmônicos homopolares, destacando a influência da harmônica de 3^a ordem. A análise realizada considera o sistema como equilibrado, desta forma não foram identificadas componentes harmônicas no neutro na frequência fundamental, assim como nas harmônicas não-triplens decorrentes do desbalanceamento das correntes de fase.

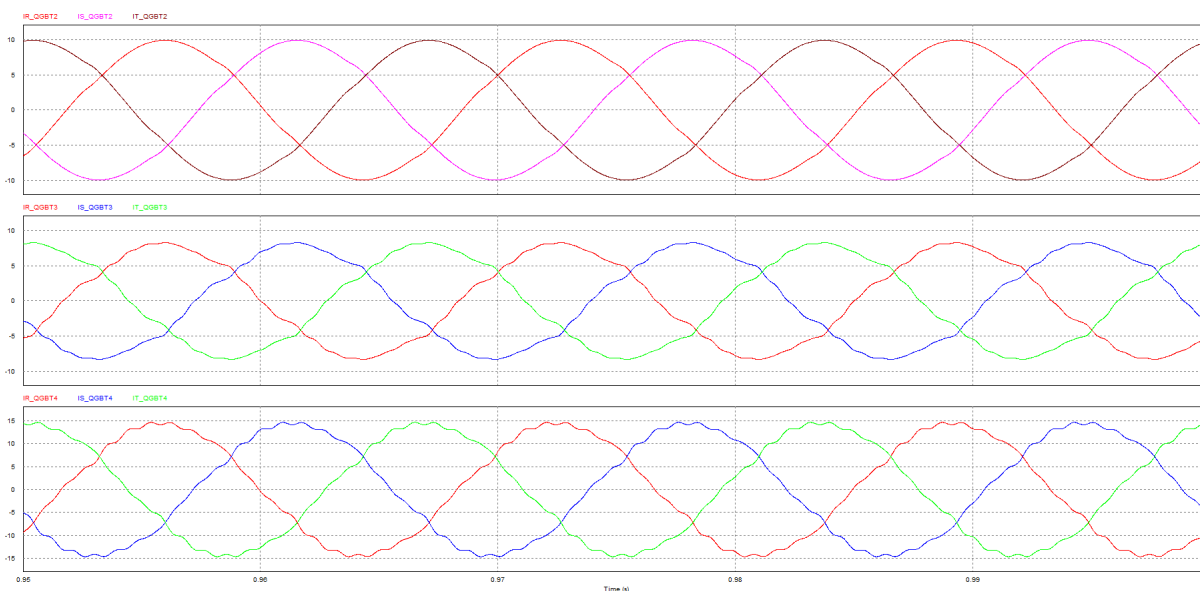
Observa-se que, para o QGBT-3 houve um aumento na corrente do condutor neutro nas harmônicas de 3^a, 9^a e 15^a ordens entre 2018 e 2023 e para o QGBT-2 somente nas harmônicas de 9^a e 15^a ordem. No entanto, no QGBT-4, os valores dessas harmônicas eram mais elevados em 2018, mas apresentaram uma redução em 2023. O aumento das correntes harmônicas de neutro dos QGBT-2 e QGBT-3 provavelmente foi causado por um crescimento de cargas não-lineares na instalação, que geram harmônicas múltiplas de três e se somam no condutor neutro.

Assim como a diminuição dos valores do QGBT-4 que também pode ter sido causada por mudanças no perfil de cargas.

4.1.1.1.3 Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores

A análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores tem por objetivo analisar o comportamento das distorções harmônicas antes da transformação de tensão. Desta forma, é possível avaliarmos se a origem das correntes harmônicas é resultante somente das cargas conectadas ao QGBTs ou se há também contribuições vindas da rede de alimentação. A Figura 18 apresenta as formas de onda das correntes de linhas vistas no lado de alta tensão dos transformadores.

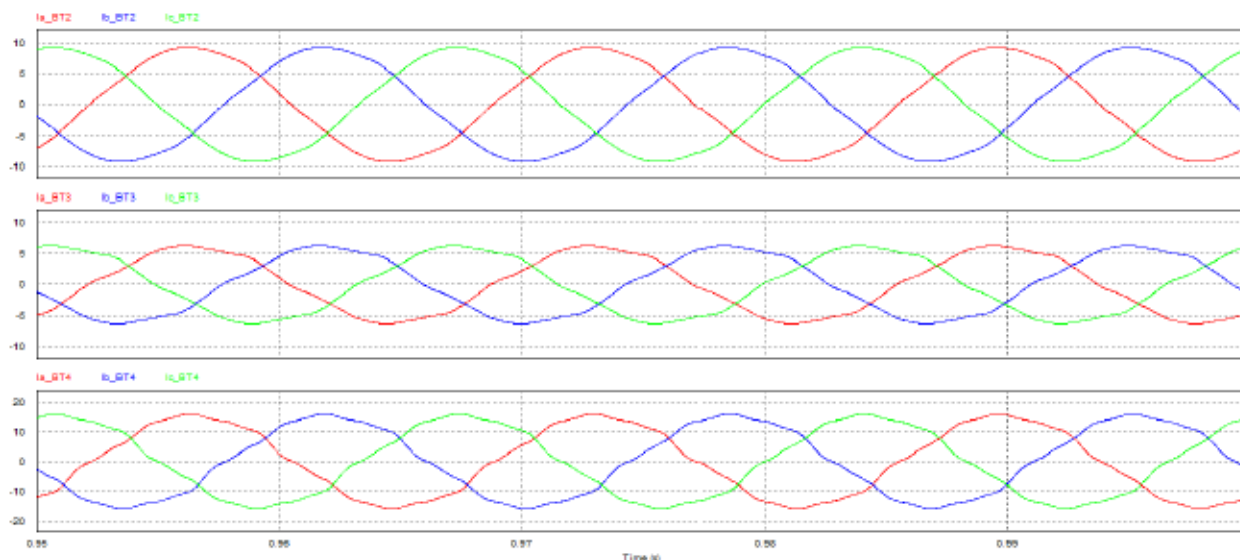
Figura 18 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores obtidas via simulação da planta equilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 19 apresenta as formas de onda das correntes de linhas vistas no lado de alta tensão dos transformadores, baseado nos dados obtidos em 2018.

Figura 19 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores, baseado nos dados obtidos em 2018



Fonte: Teodoro (2019).

É possível observar que as formas de onda de corrente do ano de 2023 possuem distorção um pouco mais acentuada nos QGBT-3 e QGBT-4 comparado as formas de onda do ano de 2018. A Tabela 20 apresenta os valores de THDi obtidos do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação.

Tabela 20 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
THDi	1,953	1,965	1,922	5,137	5,167	5,123	4,000	4,022	3,995

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao comparar esses valores com os apresentados na Tabela 5, observa-se que a distorção harmônica de corrente é menor no lado de alta tensão dos transformadores em relação ao lado de baixa tensão. Esse comportamento se explica pela conexão Dyn1 dos transformadores, onde o enrolamento delta no lado de alta tensão proporciona um caminho para as correntes harmônicas de sequência zero atenuando as harmônicas de 3ª ordem e seus múltiplos. Esses resultados evidenciam que as cargas conectadas ao lado de baixa tensão são as principais responsáveis pela geração de harmônicos no sistema.

A Tabela 21 apresenta os valores de THDi obtidos do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 21 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019

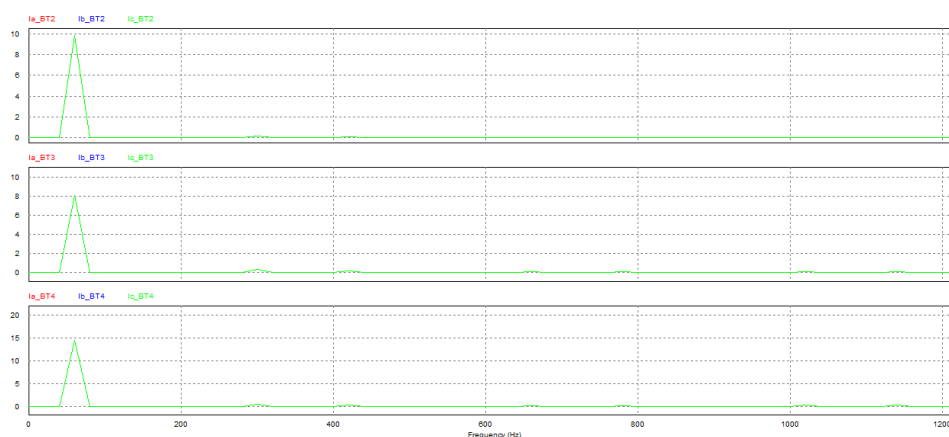
QGBT	Fase	THDi (%)
2	R	2,13
	S	2,15
	T	2,11
3	R	5,41
	S	5,43
	T	5,38
4	R	5,38
	S	5,39
	T	5,36

Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que não houve variações significativas nos valores de THDi entre os anos de 2018 e 2023, uma vez que os resultados apresentados em ambos os períodos são relativamente próximos.

A Figura 20 apresenta os espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores.

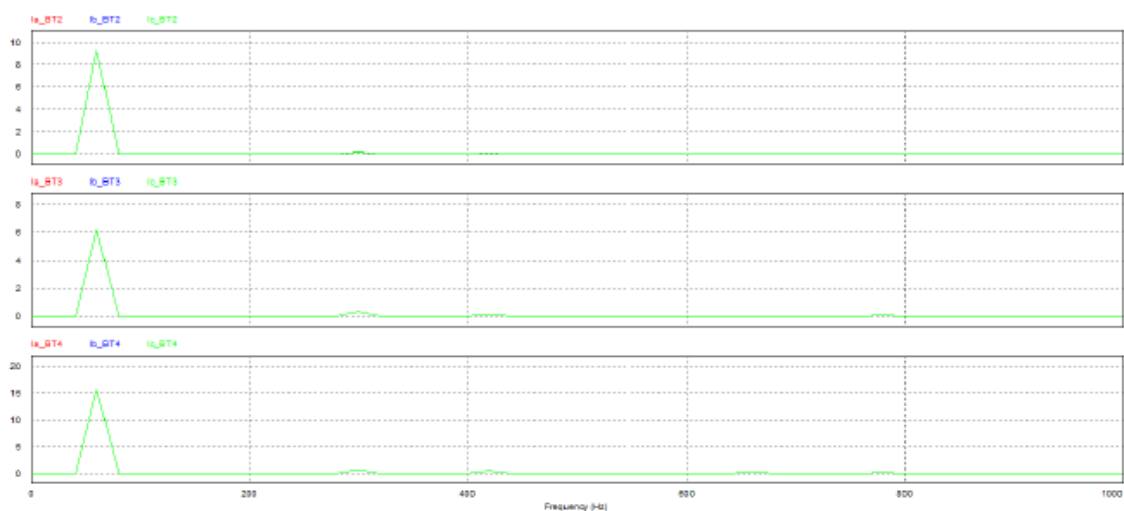
Figura 20 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores obtidos via simulação da planta equilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 21 apresenta os espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 21 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores, com base nas medições efetuadas em 2018, conforme trabalho desenvolvido em 2019



Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que os espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores não tiveram variações significativas ao longo destes cinco anos.

A Tabela 22 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação.

Tabela 22 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	1ª	9,825	9,826	9,824	8,077	8,078	8,076	14,490	14,491	14,488
	3ª	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5ª	0,160	0,160	0,161	0,336	0,336	0,336	0,364	0,363	0,364
	7ª	0,0848	0,0848	0,0852	0,178	0,178	0,178	0,235	0,236	0,236
	9ª	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11ª	0,0344	0,0342	0,0346	0,0467	0,0466	0,469	0,102	0,102	0,102
	13ª	0,0312	0,0312	0,0313	0,0873	0,0874	0,0874	0,142	0,142	0,142
	15ª	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17ª	0,00984	0,00979	0,00996	0,0722	0,0719	0,0721	0,197	0,196	0,196
	19ª	0,0125	0,0125	0,0126	0,0806	0,0809	0,0806	0,278	0,278	0,278

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 23 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 23 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1ª	6,54	6,54	6,53	4,41	4,41	4,41	11,12	11,12	11,12
3ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5ª	0,13	0,13	0,13	0,23	0,23	0,23	0,45	0,45	0,45
7ª	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31
9ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11ª	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,23	0,23	0,23
13ª	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06
15ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Teodoro (2019).

É possível observar que assim como os valores de THDi, os valores de amplitude das correntes harmônicas no lado de alta tensão do ano de 2023 são similares aos do ano de 2018. Além disso, podemos observar novamente que as

correntes harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas ficam realmente aprisionadas na ligação delta dos transformadores.

4.1.1.2 Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022

A avaliação dos níveis harmônicos de corrente na planta elétrica equilibrada modelada foi conduzida com base nas diretrizes estabelecidas pela norma IEEE Std 519-2022 (IEEE, 2022). Para essa análise, o ponto de acoplamento comum (PCC) foi considerado na entrada de alimentação de cada QGBT, permitindo verificar se os níveis de distorção harmônica estão dentro dos limites aceitáveis estipulados pela norma.

A Tabela 2 apresenta os limites estipulados pela norma, sendo necessário determinar o parâmetro I_{sc}/I_L para avaliar qual faixa de valores deve ser seguida conforme os parâmetros fornecidos pela tabela da norma. Para calcular a corrente de curto-circuito, é necessário calcular primeiramente o valor de impedância de base e o valor da impedância do transformador conforme apresentado nas Equações 28 e 24, respectivamente.

$$Z_B = \frac{V_L^2}{S_{trafo}} \quad (29)$$

Sendo:

Z_B : impedância de base (Ω);

V_L : tensão de linha (V);

S_{trafo} : potência trifásica nominal do transformador (VA).

A corrente de curto-circuito é calculada conforme apresentado na Equação 29.

$$I_{sc} = \frac{V_F}{Z_{trafo}} \quad (30)$$

Sendo:

I_{sc} : corrente de curto-circuito (A);

V_F : tensão de fase (V);

Z_{trafo} : valor da impedância do transformador (Ω).

A Tabela 24 – apresenta os resultados dos cálculos realizados para determinação da corrente de curto-circuito nos QGBTs.

Tabela 24 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
$Z_B (\Omega)$	0,2888			0,2888			0,2888		
$Z_{pu} (\%)$	5,83			7,30			7,30		
$Z_{trafo} (\Omega)$	0,0168			0,02108			0,02108		
$I_{sc} (kA)$	13030,384			10406,458			10406,458		
$I_L (A)$	251,629	251,629	251,629	206,868	206,868	206,868	371,091	371,091	371,091
I_{sc}/I_L	51,784	51,784	51,784	50,305	50,305	50,305	28,043	28,043	28,043

Fonte: Elaboração própria (2025).

A partir da determinação do parâmetro I_{sc}/I_L para cada QGBT, concluímos que, para os QGBT-2 e QGBT-3, utilizaremos a faixa de valores $50 < I_{sc}/I_L < 100$, conforme estipulado pela norma, e para o QGBT-4, a faixa será $20 < I_{sc}/I_L < 50$. Assim, foi calculado para cada fase dos respectivos QGBTs, por meio dos dados obtidos via simulação, o maior valor percentil medido entre as harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022

QGBT	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
2	7,436	0,801	0,271	0,148	0	7,467
	7,473	0,804	0,272	0,148	0	7,504
	7,466	0,805	0,272	0,149	0	7,497
3	10,065	2,202	2,248	1,260	0	5,049
	10,099	2,202	2,246	1,254	0	5,065
	10,095	2,205	2,247	1,257	0	5,063
4	9,275	2,620	3,322	0,109	0	9,962
	9,293	2,612	3,320	0,131	0	9,979
	9,285	2,619	3,324	0,102	0	9,972

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao comparar os valores obtidos e os limites estipulados pela Tabela 2, observou-se que os valores do QGBT-2 estão dentro dos parâmetros estabelecidos. No entanto, o QGBT-3 e o QGBT-4 excedem os limites definidos pela norma. O

QGBT-3 ultrapassa o valor máximo na faixa de $3 \leq h \leq 11$, enquanto o QGBT-4 ultrapassa tanto essa faixa quanto a faixa de $17 \leq h \leq 23$, além de exceder o valor máximo de TDD. Dessa forma, será necessário realizar o dimensionamento de filtros para o QGBT-3 e QGBT-4, a fim de atender aos limites estabelecidos pela norma e reduzir as componentes harmônicas excedentes.

A Tabela 26 apresenta os valores percentuais das componentes harmônicas de corrente baseado nos dados obtidos em 2018, onde é possível perceber um aumento significativo nos valores do ano de 2018 para o ano de 2023, especialmente nas faixas de $17 \leq h \leq 23$ e $23 \leq h \leq 35$. Além disso, observa-se que apenas o QGBT-4 ultrapassou os limites permitidos. Nota-se, portanto, que ao longo desses cinco anos houve um aumento na influência de cargas não-lineares na instalação, o que causou a necessidade de correção das distorções também no QGBT-3.

Tabela 26 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, baseado nos dados obtidos em 2018

QGBT	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
2	5,7%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	6,1%
	5,8%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%
	5,8%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%
3	7,4%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	9,1%
	7,4%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	9,1%
	7,4%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	9,1%
4	9,3%	2,1%	0,0%	0,0%	0,0%	10,7%
	9,3%	2,1%	0,0%	0,0%	0,0%	10,8%
	9,3%	2,1%	0,0%	0,0%	0,0%	10,8%

Fonte: Teodoro (2019).

4.1.1.3 Projeto do filtro

O projeto do filtro passivo foi elaborado para os transformadores trifásicos a seco de 500 kVA (380/220 V) dos QGBT-3 e QGBT-4, com o intuito de atenuar as componentes de terceira harmônica.

Nos bancos de capacitores do QGBT-3 e QGBT-4, quando conectados em delta, foram utilizadas uma unidade capacitiva de 91,85 μF e uma unidade capacitiva de 45,92 μF por fase, totalizando um valor de 7,5 kVAr de potência reativa capacitiva por fase, conectados em 380V. A Equação 30 apresenta o cálculo do valor da capacitância para conexão em delta.

$$C_{sh\Delta} = \frac{Q_{cap}}{V_L^2 \times 2 \times \pi \times f} \quad (31)$$

Sendo:

$C_{sh\Delta}$: valor de capacitância para conexão em delta (F);

Q_{cap} : potência reativa capacitiva (VAr);

V_L : tensão de linha (V);

f : frequência da rede de alimentação.

Para a conexão em estrela, considera-se a mesma potência reativa capacitiva de 7,5 kVAr e o valor da capacitância para esta conexão é calculado conforme a Equação 31.

$$C_{shY} = \frac{Q_{cap}}{V_F^2 \times 2 \times \pi \times f} \quad (32)$$

Sendo:

C_{shY} : valor de capacitância para conexão em estrela (F);

Q_{cap} : potência reativa capacitiva (VAr);

V_F : tensão de fase (V);

f : frequência da rede de alimentação.

Aumenta-se então a quantidade de unidades capacitivas devido a conexão em estrela do filtro *shunt*. Assim, foram consideradas 9 unidades capacitivas de 45,92 μF por fase do QGBT-3 e QGBT-4.

Após a definição do valor de capacitância por fase, foi realizado o dimensionamento do reator monofásico de modo a sintonizar o filtro *shunt* nas

frequências correspondentes à terceira harmônica, conforme a Equação 18. Como resultado, foi obtido o valor de indutância para a terceira harmônica de $L_{sh} = 1,892 \text{ mH}$

A resistência do filtro *shunt* foi determinada por meio da Equação 19, considerando um fator de qualidade igual a 100. Como resultado, foi obtido o valor de resistência para a terceira harmônica de $R_{sh} = 21,393 \text{ mH}$

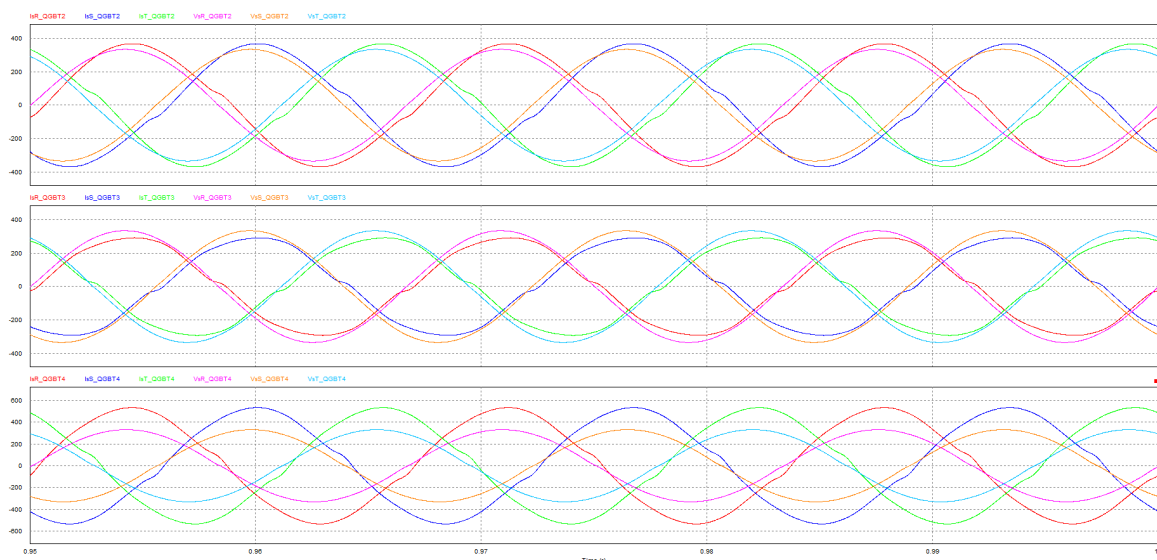
Com a definição desses parâmetros, finaliza-se o dimensionamento do filtro *shunt* LC, devidamente sintonizado para a mitigação das harmônicas de 3ª ordem.

4.1.1.3.1 Análise da THDi e demais grandezas nos QGBTs com filtros shunt

Para avaliar a THDi e demais grandezas após a inserção dos filtros shunt, foi realizada a simulação da planta elétrica equilibrada, conforme o modelo apresentado no Apêndice B.

A Figura 22 apresenta as formas de onda das componentes de tensão e de corrente dos respectivos QGBTs, após a inserção dos filtros.

Figura 22 – Corrente e tensão dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 27 apresenta os valores das grandezas dos respectivos QGBTs, obtidos pela simulação da planta equilibrada com a inserção dos filtros.

Tabela 27 – Valores das grandezas dos respectivos QGBTs com a inserção dos filtros, obtidos via simulação da planta equilibrada

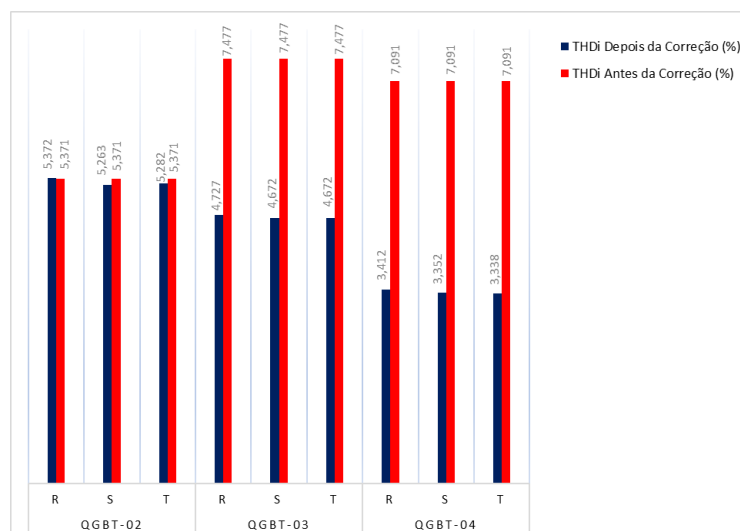
QGBT	Fase	V _{ef1} (V)	I _{ef1} (A)	FP	THDi (%)	P (kW)	S (kVA)
2	R	235,374	251,693	0,985	5,372	58,463	59,325
	S	235,339	251,660	0,985	5,263	58,447	59,309
	T	235,337	251,647	0,985	5,282	58,443	59,305
3	R	236,156	205,670	0,999	4,276	48,566	48,614
	S	236,121	205,639	0,999	4,221	48,552	48,599
	T	236,120	205,634	0,999	4,218	48,550	48,598
4	R	235,051	370,884	0,998	3,206	87,063	87,221
	S	235,018	370,834	0,998	3,143	87,039	87,198
	T	235,015	370,820	0,998	3,129	87,035	87,193

Fonte: Elaboração própria (2025).

Comparando os valores das grandezas antes da inserção do filtro, apresentados na Tabela 11, verifica-se que os valores de THDi do QGBT-3 foram reduzidos em aproximadamente 37%, enquanto os do QGBT-4 sofreram uma diminuição de cerca de 53%. Além disso, observa-se que o caminho de baixa impedância criado pelos filtros *shunt* não provocou alterações nos valores de THDi do QGBT-2.

A Figura 23 apresenta uma comparação entre os valores de THDi de cada QGBT antes e após a correção com os filtros, em que se torna ainda mais evidente a diminuição dos valores de THDi dos QGBT-3 e QGBT-4.

Figura 23 – Comparativo entre os valores de THDi dos respectivos QGBTs antes e depois da inserção dos filtros

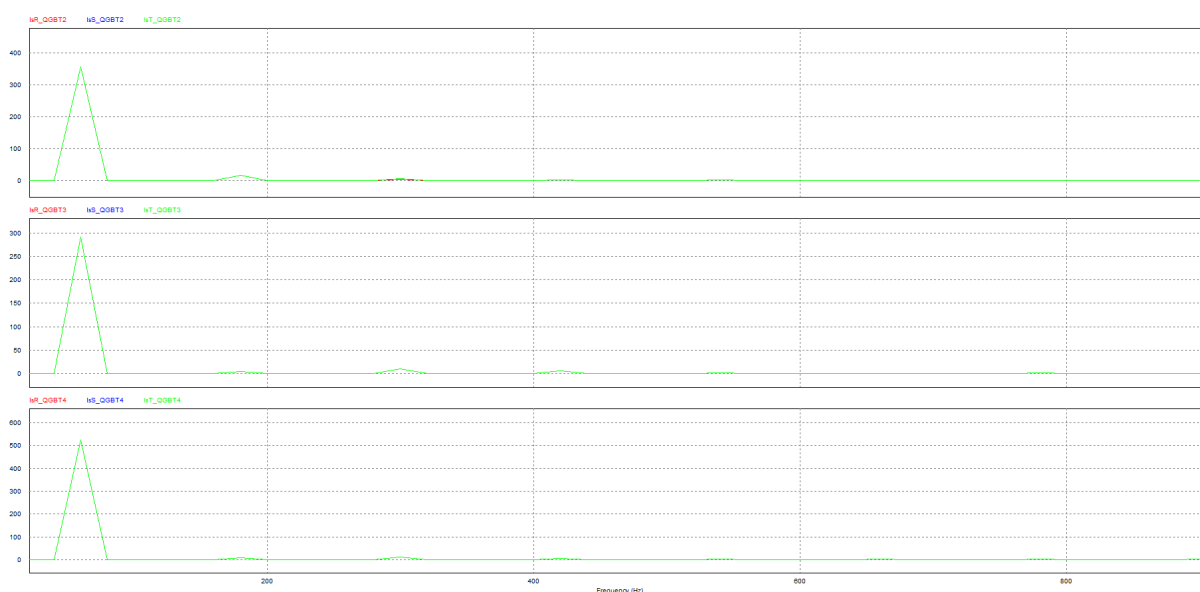


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.1.3.2 Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs com filtros shunt

Foi realizada a análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBT após a inserção dos filtros, apresentada na Figura 24, com o objetivo de verificar a efetividade dos filtros na atenuação das distorções harmônicas, avaliando a redução dos harmônicos predominantes.

Figura 24 – Amplitudes das componentes harmônicas de corrente com filtros shunt



Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma redução significativa nas amplitudes das componentes harmônicas de corrente nos QGBT-3 e QGBT-4, com destaque para as harmônicas de terceira e quinta ordem. Para uma avaliação mais precisa dos resultados, a Tabela 28 apresenta os valores das amplitudes das componentes harmônicas de corrente em cada fase dos respectivos QGBTs.

Tabela 28 – Valores das amplitudes das componentes harmônicas de corrente em cada fase dos respectivos QGBTs com inserção dos filtros

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	3 ^a	17,283	17,375	17,351	4,934	4,932	5,096	9,705	9,894	9,814
	5 ^a	5,807	5,82	5,833	10,879	10,901	10,913	11,573	11,567	11,619
	7 ^a	3,074	3,082	3,081	5,487	5,494	5,491	6,969	6,990	6,967
	9 ^a	2,603	2,626	2,620	2,011	2,025	2,022	3,838	3,849	3,843
	11 ^a	1,250	1,252	1,257	1,140	1,144	1,149	2,276	2,268	2,288
	13 ^a	1,147	1,150	1,149	1,836	1,840	1,838	2,447	2,456	2,443
	15 ^a	1,056	1,067	1,064	1,008	1,014	1,012	1,830	1,832	1,830
	17 ^a	0,404	0,403	0,407	0,696	0,695	0,697	1,011	1,009	1,022
	19 ^a	0,482	0,482	0,481	0,435	0,435	0,434	0,828	0,830	0,820
	21 ^a	0,281	0,288	0,286	0,358	0,362	0,360	0,273	0,272	0,270
	23 ^a	0,210	0,208	0,211	0,293	0,291	0,293	0,210	0,202	0,211
	25 ^a	0,284	0,282	0,281	0,244	0,241	0,241	0,206	0,206	0,202

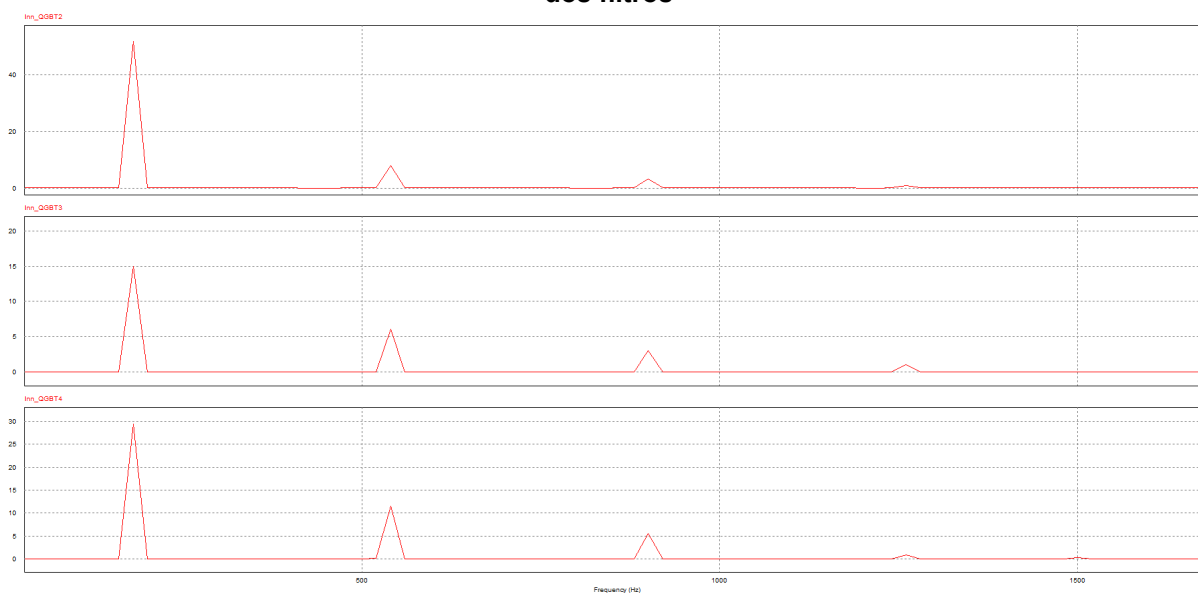
Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma redução significativa nas amplitudes das componentes harmônicas de corrente de 3^a ordem nos QGBT-3 e QGBT-4. Além disso, nota-se que as harmônicas de 17^a e 19^a ordem no QGBT-4, que apresentavam valores elevados, também foram atenuadas com a inserção dos filtros. Isso ocorre porque, embora os filtros *shunt* tenham sido projetados para a mitigação das harmônicas de 3^a ordem, eles também podem impactar outras frequências harmônicas. Isso acontece devido às características dinâmicas dos filtros e ao caminho de baixa impedância que eles criam, o que pode influenciar a circulação de correntes harmônicas de ordens superiores.

4.1.1.3.3 Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs com filtros *shunt*

A análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs com filtros *shunt* tem como foco avaliar como a aplicação desses filtros afeta a corrente no condutor de neutro. A Figura 25 apresenta o espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros *shunt* na planta.

Figura 25 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a análise da FFT, foram realizadas medições das amplitudes das harmônicas de ordem múltipla de três na corrente do condutor de neutro dos QGBTs, conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 – Valores das amplitudes das harmônicas de ordem múltipla de três na corrente do condutor de neutro dos QGBTs com filtros

Componente harmônica de corrente	QGBT-2		QGBT-3		QGBT-4	
	Planta equilibrada	Planta equilibrada com filtros	Planta equilibrada	Planta equilibrada com filtros	Planta equilibrada	Planta equilibrada com filtros
3 ^a	52,009	52,009	46,328	14,961	90,055	29,412
9 ^a	7,849	7,849	6,249	6,058	11,866	11,531
15 ^a	3,186	3,186	3,123	3,034	5,636	5,493
21 ^a	0,854	0,854	1,112	1,080	0,836	0,815

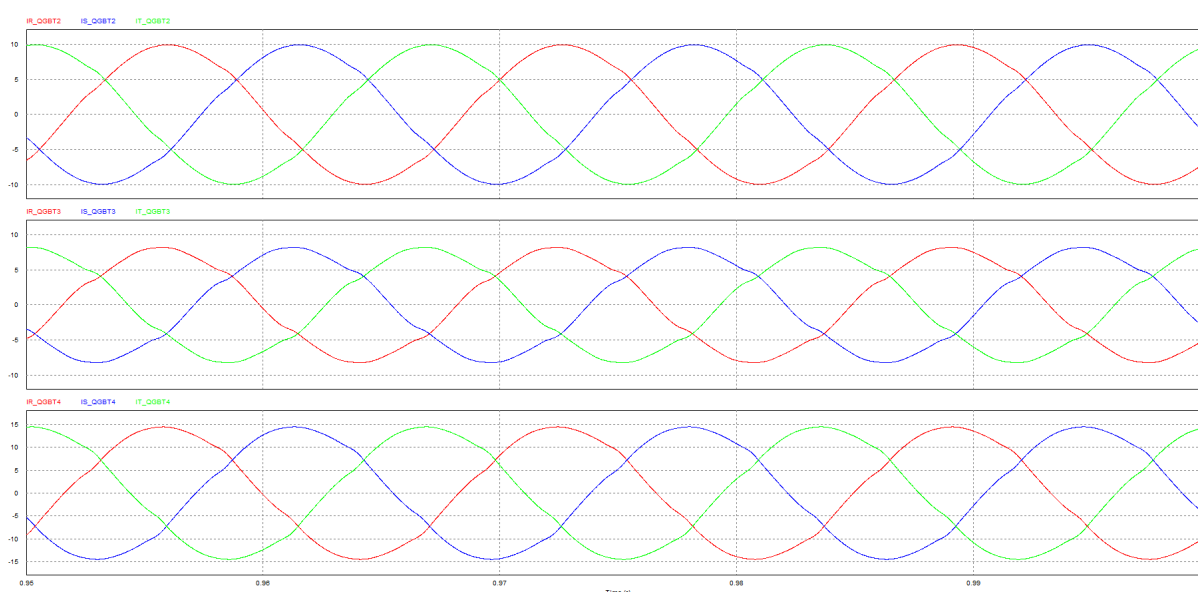
Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma redução significativa nas amplitudes das harmônicas de 3^a ordem para os QGBT-3 e QGBT-4, enquanto os demais valores permaneceram próximos aos registrados antes da inserção dos filtros.

4.1.1.3.4 Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores com filtros shunt

A Figura 26 apresenta as formas de onda das correntes vistas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, obtidas via simulação da planta equilibrada com a inserção dos filtros.

Figura 26 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores obtidas via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros



Fonte: Elaboração própria (2025).

Comparando com a análise sem a inserção dos filtros, observa-se uma redução significativa das distorções nas formas de onda das correntes dos QGBT-3 e QGBT-4. A Tabela 30 apresenta os valores de $THDi$ obtidos do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada após a inserção dos filtros.

Tabela 30 – Valores de $THDi$ vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros

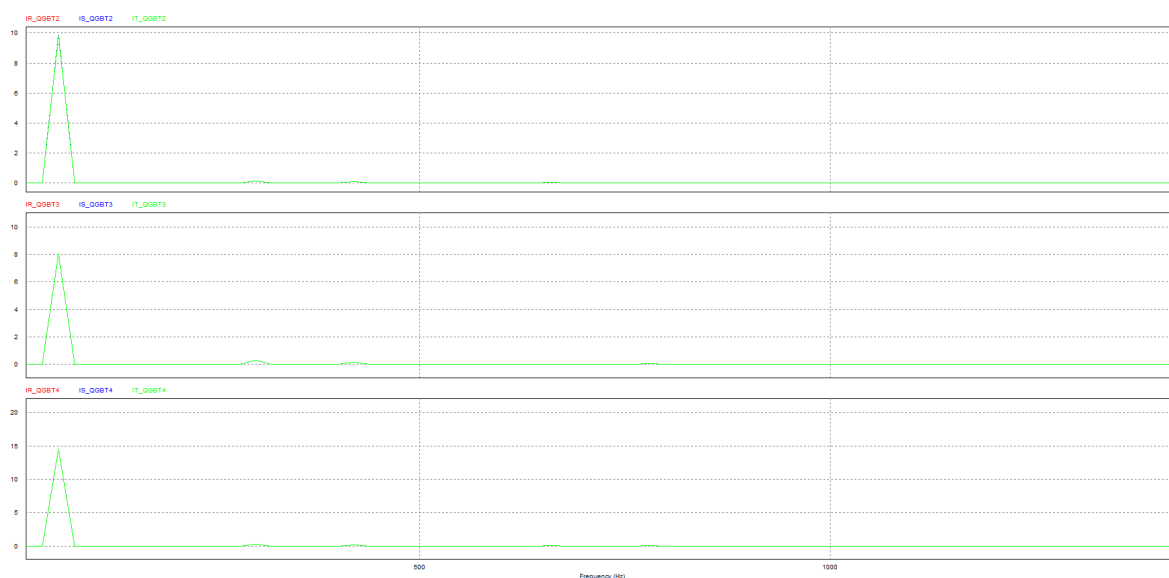
QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
$THDi$	1,957	1,969	1,926	4,304	4,311	4,471	2,676	2,698	2,671

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que os valores de THD_i do QGBT-02 permaneceram praticamente inalterados em relação aos obtidos sem a inserção dos filtros, enquanto os QGBT-3 e QGBT-4 apresentaram uma redução. Essa diminuição se deve à mitigação das componentes harmônicas múltiplas de 3 pelos filtros *shunt* no lado de baixa tensão, o que reduz a circulação de correntes harmônicas refletidas para o lado de alta tensão, resultando em uma menor THD_i .

A Figura 27 apresenta o espectro harmônico das correntes no lado de alta tensão dos transformadores.

Figura 27 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 31 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros.

Tabela 31 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	1ª	9,827	9,827	9,826	8,034	8,034	8,033	14,489	14,490	14,488
	3ª	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5ª	0,161	0,160	0,161	0,300	0,300	0,301	0,320	0,319	0,320
	7ª	0,0849	0,0849	0,0852	0,152	0,152	0,152	0,192	0,193	0,193
	9ª	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11ª	0,0346	0,0344	0,0348	0,0316	0,0315	0,0318	0,0631	0,0626	0,0630
	13ª	0,0317	0,0317	0,0318	0,0507	0,0507	0,0508	0,0674	0,0678	0,0676
	15ª	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17ª	0,0112	0,0111	0,0113	0,0192	0,0192	0,0193	0,0282	0,0279	0,0281
	19ª	0,0133	0,0133	0,0133	0,0120	0,0120	0,0120	0,0227	0,0229	0,0228

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que, após a inserção dos filtros, as amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos QGBTs permanecem próximas aos valores obtidos sem os filtros, mantendo o mesmo comportamento de aprisionamento das harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas no delta do transformador.

4.1.1.3.5 Comparação com as soluções propostas nos estudos de 2019

Com base nos dados de 2018, foram propostas soluções com filtros *shunt* 3C1L para a correção das correntes harmônicas, sendo identificada a necessidade de mitigação apenas no QGBT-4. No entanto, a análise dos dados de 2023 revelou a necessidade de estender a correção também ao QGBT-3, refletindo mudanças no perfil harmônico do sistema ao longo dos anos e evidenciando alterações na instalação. Dessa forma, as soluções propostas anteriormente não seriam suficientes para atender ao perfil da instalação em 2023.

É importante destacar que, embora a topologia *shunt* utilizada no presente estudo seja diferente da topologia 3C1L, essa diferença não compromete a comparação entre as soluções. Além disso, de acordo com Teodoro (2019), a filtragem da harmônica de 3ª proposta em seu trabalho não foi suficiente para atender os limites recomendados pela norma, pois houve um aumento da componente harmônica de 7ª ordem após a inserção do filtro *shunt* 3C1L.

Em contrapartida, de acordo com Dantas (2019), os filtros propostos em seu trabalho alcançaram o desempenho necessário para atender a recomendação normativa.

4.1.1.4 Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022 com filtros shunt

A avaliação dos níveis harmônicos de corrente na planta elétrica equilibrada modelada foi conduzida com base nas diretrizes estabelecidas pela norma IEEE Std 519-2022 (IEEE, 2022). Para essa análise, o ponto de acoplamento comum (PCC) foi considerado na entrada de alimentação de cada QGBT, permitindo verificar se os níveis de distorção harmônica estão dentro dos limites aceitáveis estipulados pela norma.

A Tabela 2 apresenta os limites estipulados pela norma, sendo necessário determinar o parâmetro I_{sc}/I_L para avaliar qual faixa de valores deve ser seguida conforme os parâmetros fornecidos pela tabela da norma.

A Tabela 32 apresenta os resultados dos cálculos realizados para determinação da corrente de curto-circuito nos QGBTs.

Tabela 32 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L com inserção dos filtros

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
Z_B (Ω)	0,2888			0,2888			0,2888		
Z_{pu} (%)	5,83			7,30			7,30		
Z_{trafo} (Ω)	0,0168			0,02108			0,02108		
I_{sc} (kA)	13030,384			10406,458			10406,458		
I_L (A)	251,664	251,632	251,620	205,759	205,729	205,720	371,078	371,030	371,013
I_{sc}/I_L	51,777	51,783	51,786	50,580	50,583	50,585	28,044	28,047	28,049

Fonte: Elaboração própria (2025).

A partir da determinação do parâmetro I_{sc}/I_L para cada QGBT, concluímos que, para o QGBT-2 e QGBT-3, utilizaremos a faixa de valores $50 < I_{sc}/I_L < 100$, conforme estipulado pela norma, e para o QGBT-4, a faixa será $20 < I_{sc}/I_L < 50$. Dessa forma, para cada fase dos respectivos QGBTs, foi calculado, com base nos dados obtidos via simulação, o maior valor percentil medido entre as harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022 com inserção dos filtros

QGBT	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
2	7,436	0,810	0,286	0,140	0	7,468
	7,474	0,814	0,287	0,139	0	7,507
	7,467	0,814	0,288	0,140	0	7,499
3	6,4868	1,207	0,458	0,185	0	3,199
	6,4987	1,211	0,458	0,184	0	3,206
	6,5330	1,211	0,458	0,184	0	3,222
4	4,641	1,062	0,364	0,079	0	4,728
	4,672	1,063	0,364	0,078	0	4,759
	4,667	1,064	0,365	0,079	0	4,754

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao comparar com os valores estipulados pela norma, conforme apresentados na Tabela 2, observamos que, após a correção com os filtros *shunt* implementados nos QGBT-3 e QGBT-4, os parâmetros ficaram dentro dos limites recomendados. Assim, podemos concluir que os filtros foram eficazes na correção das distorções harmônicas em ambos os QGBTs.

4.1.2 Sistema trifásico real

O sistema trifásico real considera o elevado desequilíbrio entre as fases, refletindo o comportamento do sistema real obtido a partir das medições fornecidas pela instituição. Com base nos valores das medições, foi realizado um tratamento dos dados, no qual foi calculado o percentil de 95% para cada conjunto de dados.

A corrente demandada e a tensão eficaz na frequência fundamental de cada QGBT no sistema equilibrado foram obtidas a partir dos valores dos percentis de 95% de cada conjunto de dados das três fases dos QGBTs.

Os valores de taxas de distorção harmônica de tensão e de corrente foram determinados a partir dos percentis de 95% de cada valor de corrente e tensão das componentes múltiplas da fundamental para cada QGBT conforme apresentado na Equação 1.

Os valores de potência aparente e fator de potência foram calculados a partir dos valores dos percentis de 95% de cada conjunto de dados das três fases dos

QGBTs. A potência ativa foi calculada por meio dos valores de potência aparente e fator de potência para cada fase de cada QGBT.

A Tabela 34 apresenta os dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado.

Tabela 34 – Dados obtidos e tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado

QGBT	Fase	V_{ef1} (V)	I_{ef1} (A)	FP	THDi (%)	P (kW)	S (kVA)
2	R	232,214	256,762	0,987	5,058	57,153	57,883
	S	233,236	232,545	0,988	7,061	52,233	52,947
	T	235,471	260,210	0,980	4,700	58,428	59,700
3	R	232,335	256,762	0,985	6,858	36,205	36,615
	S	233,003	181,962	0,994	6,951	40,507	40,801
	T	235,158	190,363	0,985	8,081	41,756	42,435
4	R	232,280	357,953	0,994	8,252	83,008	83,661
	S	232,740	436,420	0,994	5,997	102,312	102,930
	T	235,554	327,856	0,994	6,485	77,215	77,862

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 35 apresenta os resultados obtidos dos dados tratados das medições nos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 35 – Dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

QGBT	Fase	V_{1ef} (V)	I_{1ef} (A)	FP	THDi (%)	THD _v (%)	S (kVA)	P (kW)
2	R	229,01	237,92	0,95	5,26	2,83	53,44	50,72
	S	228,34	244,57	0,97	7,34	2,90	54,42	52,73
	T	231,18	228,23	0,94	5,52	2,85	51,97	48,96
3	R	228,76	153,75	0,99	9,00	1,78	38,32	37,80
	S	229,18	150,62	0,99	8,90	1,72	31,43	31,14
	T	230,49	172,73	0,98	8,13	1,50	40,06	39,24
4	R	226,87	345,37	0,97	11,17	2,32	82,97	80,88
	S	225,33	474,63	0,98	8,21	2,32	112,98	110,80
	T	229,24	337,28	0,97	12,14	2,07	80,24	77,78

Fonte: Teodoro (2019).

A Tabela 36 apresenta a variação percentual das grandezas elétricas medidas nos QGBTs entre os anos de 2018 e 2023.

Tabela 36 – Variação percentual das grandezas elétricas nos QGBTs entre 2018 e 2023

QGBT	Fase	ΔV_{ef} (%)	ΔI_{ef} (%)	ΔFP (%)	$\Delta THDi$ (%)	ΔP (%)	ΔS (%)
2	R	1,399	7,919	3,895	3,840	12,683	8,314
	S	2,144	4,917	1,856	3,801	0,943	2,707
	T	1,856	14,012	4,255	14,855	19,338	14,874
3	R	1,563	67,000	0,505	23,800	4,220	4,449
	S	1,668	20,809	0,404	21,899	30,080	29,815
	T	2,025	10,208	0,510	0,603	6,412	5,929
4	R	2,385	3,643	2,474	26,124	2,631	0,833
	S	3,289	8,050	1,429	26,955	7,661	8,895
	T	2,754	2,794	2,474	46,582	0,726	2,964

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se alterações nos valores do fator de potência, com um aumento em 2023 para os valores do QGBT-2 em comparação a 2018, em contrapartida para os valores do QGBT-3 e do QGBT-4 houve uma diminuição em comparação a 2018. Em relação aos valores de tensão, não houve grandes alterações; no entanto, os valores de corrente do QGBT-3 apresentaram um aumento expressivo em comparação a 2018. As taxas de distorção total, tanto de corrente quanto de tensão, também sofreram alterações. Nota-se que, em 2018, os valores das taxas de distorção de corrente eram maiores no QGBT-3 e QGBT-4 em comparação aos valores de 2023, enquanto os valores das taxas de distorção de tensão eram menores em 2018 para todos os QGBTs, em comparação aos valores de 2023.

A Tabela 37 apresenta os valores de fator de distorção de corrente (F_{disti}), fator de distorção de tensão (F_{distv}) e fator de deslocamento (F_{desl}) de cada fase dos respectivos QGBTs, calculados por meio das Equações 11, 12 e 13

Tabela 37 – Valores obtidos de F_{disti} , F_{distv} e F_{desl} para planta desequilibrada

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
F_{disti}	0,999	0,998	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,998	0,998
F_{distv}	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
F_{desl}	0,990	0,990	0,981	0,992	0,996	0,988	0,996	0,997	0,995

Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme apresentado na planta equilibrada, os QGBT-3 e QGBT-4 possuem bancos capacitivos conectados em delta, compostos por estágios de 5 kVAr e 2,5 kVAr. O mesmo banco capacitivo calculado na planta equilibrada é utilizado na planta real.

Considerando esse banco capacitivo adicionado ao sistema, recalcula-se o ângulo da corrente da componente fundamental antes da correção realizada pelo banco de capacitores. Com o valor do ângulo e utilizando as Equações 8 e 10, é possível realizar a modelagem das cargas lineares do tipo RL dos QGBTs, conforme os resultados apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs para a planta desequilibrada

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
$Z (m\Omega)$	904,393	1002,969	904,927	904,865	1280,507	1235,318	648,913	533,293	718,466
$Rl (m\Omega)$	895,131	992,790	887,525	876,888	1251,478	1187,615	638,957	525,136	704,788
$Ll (\mu H)$	342,458	378,058	468,485	592,227	719,140	901,800	300,367	246,472	370,101
Ângulo (°)	8,207	8,170	11,255	14,285	12,223	15,974	10,050	10,034	11,198

Fonte: Elaboração própria (2025).

Para modelar as cargas não lineares, foram utilizadas fontes de corrente, nas quais foram incorporadas as correntes harmônicas de ordem ímpar medidas, conectadas em paralelo à carga RL. No sistema desequilibrado, as amplitudes dessas correntes foram determinadas diretamente pelos valores dos percentis de 95% de cada conjunto de dados para as três fases de cada QGBT. A Tabela 39 apresenta esses valores.

Tabela 39 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema desequilibrado

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	3 ^a	11,215	15,595	10,905	12,571	9,382	11,813	26,00354	23,245	18,0388
	5 ^a	5,380	3,519	4,172	9,971	6,576	9,073	10,837	9,529	8,218
	7 ^a	2,324	2,450	2,294	6,326	4,380	2,226	6,579	5,476	5,430
	9 ^a	1,792	2,163	2,019	1,798	1,246	1,653	3,765	3,099	2,686
	11 ^a	0,873	1,045	1,031	1,041	0,881	0,804	2,512	1,610	1,717
	13 ^a	1,377	0,462	0,898	2,055	1,379	0,927	2,295	1,245	2,780
	15 ^a	0,735	0,845	0,870	0,830	0,878	0,651	1,278	0,974	2,382
	17 ^a	0,395	0,295	0,284	0,576	0,711	0,370	0,991	0,907	0,746
	19 ^a	0,340	0,502	0,310	0,311	0,414	0,317	0,575	0,530	1,0421
	21 ^o	0,309	0,339	0,0112	0,344	0,292	0,2057	0,263	0,274	0,153
	23 ^a	0,286	0,213	0,00860	0,276	0,159	0,26168	0,278	0,272	0,000217
	25 ^a	0,00195	0,360	0,315	0,000717	0,288	0,289	0,000	0,283	0,251

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 40 apresenta os resultados obtidos da amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares, também considerando o sistema desequilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 40 – Amplitude das componentes harmônicas de ordens ímpares considerando o sistema desequilibrado, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
3 ^a	12,18	17,67	12,23	13,00	11,66	11,63	38,82	39,56	41,56
5 ^a	6,14	4,93	3,82	6,87	7,00	8,00	12,60	13,64	11,18
7 ^a	0,90	2,03	1,76	1,78	1,48	2,28	5,50	6,55	5,09
9 ^a	1,44	2,02	1,72	1,04	0,80	0,42	4,61	4,30	4,14
11 ^a	0,89	1,50	0,70	0,73	0,49	0,42	2,86	2,49	2,39
13 ^a	0,58	0,56	0,60	0,53	0,32	0,35	1,86	1,69	1,69
15 ^a	0,47	0,78	0,27	0,45	0,30	0,04	1,37	0,99	1,14

Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se uma alteração nos valores das componentes harmônicas quando comparados aos de 2018, o que pode ser atribuído a mudanças no perfil das cargas da instalação. Por exemplo, para as medições de 2023, nota-se que a componente fundamental teve uma redução de amplitude, enquanto para outras, dependendo do QGBT analisado, houve um aumento na amplitude da componente harmônica.

4.1.2.1 *Análise e validação da modelagem da planta desequilibrada*

Para validação da modelagem da planta desequilibrada, foi realizada uma comparação entre os valores medidos na planta real e os resultados obtidos por meio da simulação, com o objetivo de verificar se os desvios entre os dados reais e simulados estão dentro de limites aceitáveis. Para isso, foram calculados os erros absolutos, permitindo analisar de forma quantitativa a precisão da modelagem. Em seguida, serão apresentados os valores resultantes da simulação, permitindo uma avaliação detalhada da aderência do modelo à realidade.

A Tabela 41 apresenta os valores das grandezas obtidos pela simulação da planta desequilibrada modelada.

Tabela 41 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta real

QGBT	Fase	V_{ef1} (V)	I_{ef1} (A)	FP	THDi (%)	P (kW)	S (kVA)
2	R	235,358	260,238	0,987	4,806	60,620	61,318
	S	235,437	234,743	0,988	6,850	54,699	55,390
	T	235,114	259,804	0,980	4,501	59,905	61,143
3	R	235,149	254,888	0,985	7,034	59,204	60,085
	S	235,885	180,633	0,994	7,340	42,468	42,725
	T	235,659	185,564	0,985	8,545	43,228	43,892
4	R	234,928	357,520	0,994	8,358	83755	84,290
	S	234,175	434,146	0,994	6,001	101,230	101,860
	T	235,044	322,105	0,994	7,209	75,440	75,919

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 42 apresenta os valores de erro relativo obtidos na comparação entre os valores medidos e simulados para a planta desequilibrada.

Tabela 42 – Valores de erro relativo obtidos entre os valores medidos e valores simulados para planta desequilibrada

QGBT	Grandeza	Erro Fase R (%)	Erro Fase S (%)	Erro Fase T (%)
2	V_{ef1} (V)	1,354	0,945	0,151
	I_{ef1} (A)	1,354	2,994	0,156
	FP	0,987	0,051	0,072
	THDi (%)	4,979	2,994	4,232
	P (kW)	6,000	4,721	2,528
	S (kVA)	5,935	4,616	2,418
3	V_{ef1} (V)	1,211	1,237	0,213
	I_{ef1} (A)	0,730	0,731	2,521
	FP	0,354	0,110	0,087
	THDi (%)	2,568	5,594	5,738
	P (kW)	63,523	4,841	3,525
	S (kVA)	64,099	4,716	3,435
4	V_{ef1} (V)	1,140	0,617	0,216
	I_{ef1} (A)	0,121	0,521	1,754
	FP	0,145	0,020	0,201
	THDi (%)	1,279	0,071	11,154
	P (kW)	0,900	1,057	2,299
	S (kVA)	0,753	1,039	2,494

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que todos os valores apresentaram erros inferiores a 6%, exceto para as potências do QGBT-3 e para um valor de THDi do QGBT-4. Contudo, ao calcular essas potências a partir das tensões e correntes eficazes medidas, os resultados obtidos são muito próximos aos valores simulados. Isso indica que a aplicação do percentil 95% pode ter excluído alguns dados relevantes, impactando os valores de potência, assim como os valores de THDi. Assim, podemos concluir que a modelagem da planta está em conformidade com a instalação real.

Com o modelo proposto validado, podemos avançar para a análise dos resultados. A planta modelada utilizada para a simulação está apresentada no Apêndice C.

A Tabela 43 apresenta os valores das grandezas obtidos pela simulação da planta desequilibrada modelada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 43 – Valores das grandezas obtidos via simulação da planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

QGBT	Fase	FP	THD_i (%)	V_{sef} (V)	I_{sef} (A)
2	R	0,95	5,65	229,25	238,53
	S	0,97	7,30	229,36	246,33
	T	0,94	5,60	229,18	226,60
3	R	0,94	10,93	229,64	169,33
	S	0,96	10,62	229,94	136,87
	T	0,94	11,46	229,45	174,42
4	R	0,95	11,89	227,73	366,70
	S	0,93	8,42	225,23	513,07
	T	0,95	13,02	227,94	344,71

Fonte: Teodoro (2019).

A Tabela 44 apresenta a variação percentual das grandezas elétricas obtidas via simulação da planta desequilibrada nos QGBTs entre os anos de 2018 e 2023.

Tabela 44 – Variação percentual das grandezas elétricas obtidas via simulação da planta desequilibrada nos QGBTs entre 2018 e 2023

QGBT	Fase	ΔV_{ef1} (%)	ΔI_{ef1} (%)	ΔFP (%)	$\Delta THDi$ (%)
2	R	2,664	9,101	3,895	14,938
	S	2,650	4,704	1,856	6,164
	T	2,589	14,653	4,255	19,625
3	R	2,399	50,527	4,787	35,645
	S	2,585	31,974	3,542	30,885
	T	2,706	6,389	4,787	25,436
4	R	3,161	2,503	4,632	29,706
	S	3,971	15,383	6,882	28,729
	T	3,117	6,558	4,632	44,631

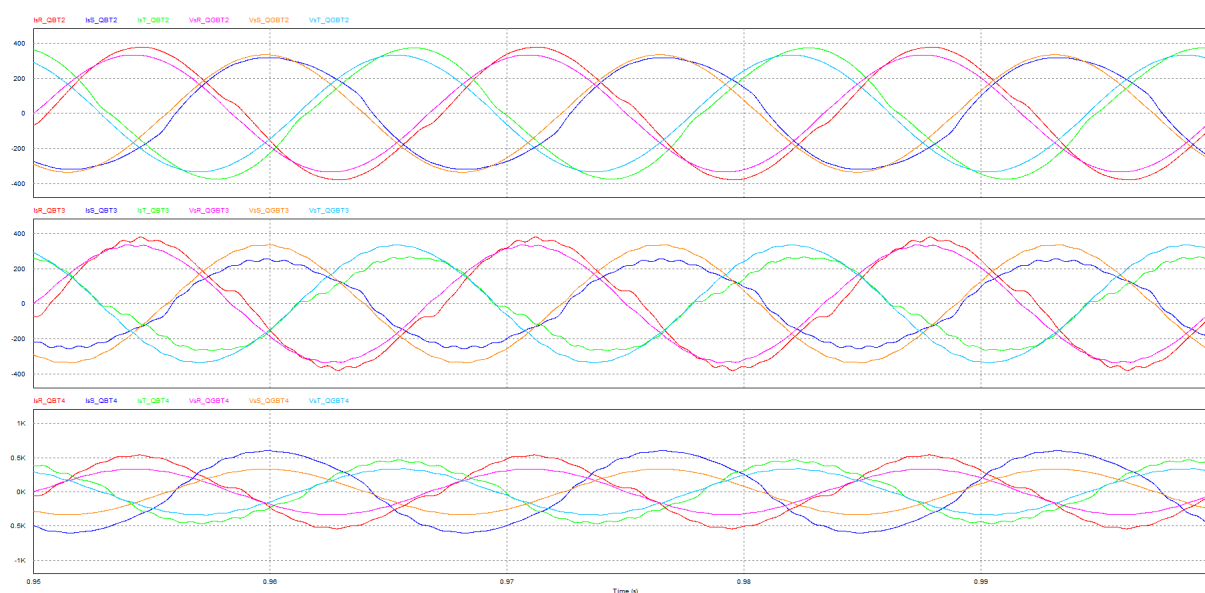
Fonte: Elaboração própria (2025).

Entre 2018 e 2023, os valores de tensão eficaz não tiveram alterações significativas, com variações inferiores a 4%, enquanto os valores de corrente apresentaram aumentos expressivos, especialmente no QGBT-3 na fase R e no QGBT-4 na fase S, indicando um possível aumento na carga elétrica da instalação. O fator de potência teve variações menores que 5%. No entanto, a distorção harmônica

total de corrente aumentou significativamente, com destaque para o QGBT-4 na fase T e o QGBT-3 na fase R, o que pode indicar um aumento de cargas não lineares na instalação.

A Figura 28 apresenta as componentes de corrente e tensão vistas pelo alimentador em cada fase de cada QGBT.

Figura 28 – Corrente e tensão vistas pelo alimentador nas fases R, S e T de cada QGBT obtidos via simulação da planta desequilibrada

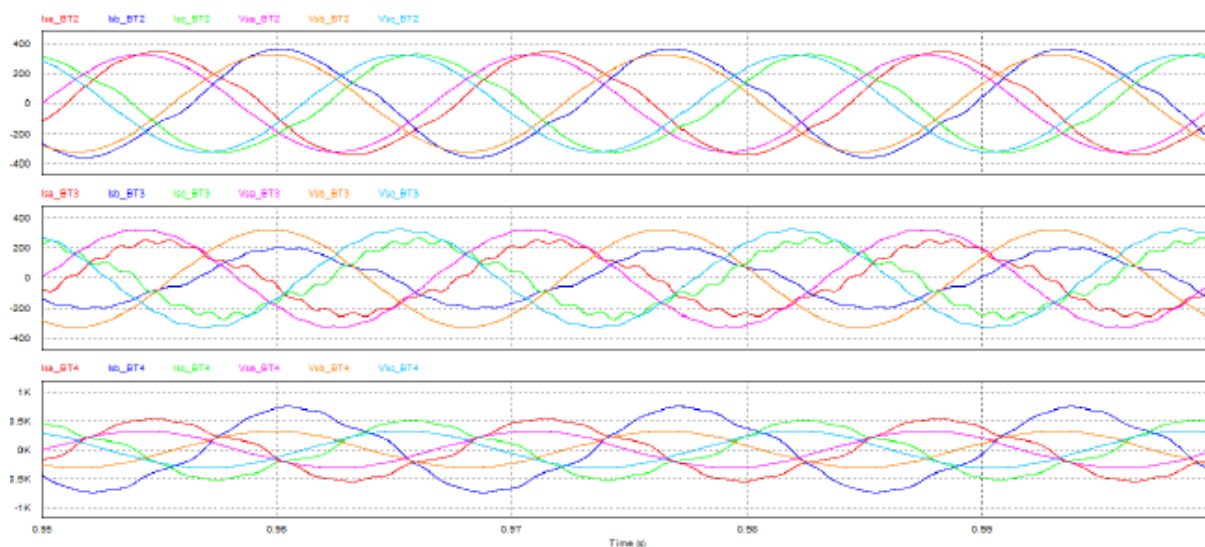


Fonte: Elaboração própria (2025).

Nota-se que as formas de onda de corrente e tensão das fases do QGBT-2 são quase senoidais, sem distorções aparentes ou variações significativas nas amplitudes, indicando ausência de harmônicas significativas. No QGBT-3 as formas de onda apresentam leve assimetria nas correntes de fase, indicando um pequeno desequilíbrio entre fases, contudo as formas de tensão parecem equilibradas e quase senoidais, também sem indícios significativos de distorções harmônicas. Já o QGBT-4 apresenta distorções mais evidentes nas formas de onda de corrente, indicando distorções harmônicas relevantes e embora a forma de onda de tensão esteja próxima a ser senoidal, apresenta pequenas variações, possivelmente refletindo a influência da carga distorcida presente na instalação.

A Figura 29 apresenta as componentes de corrente e tensão vistas pelo alimentador em cada fase de cada QGBT que foram obtidas, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 29 – Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019, para a planta desequilibrada



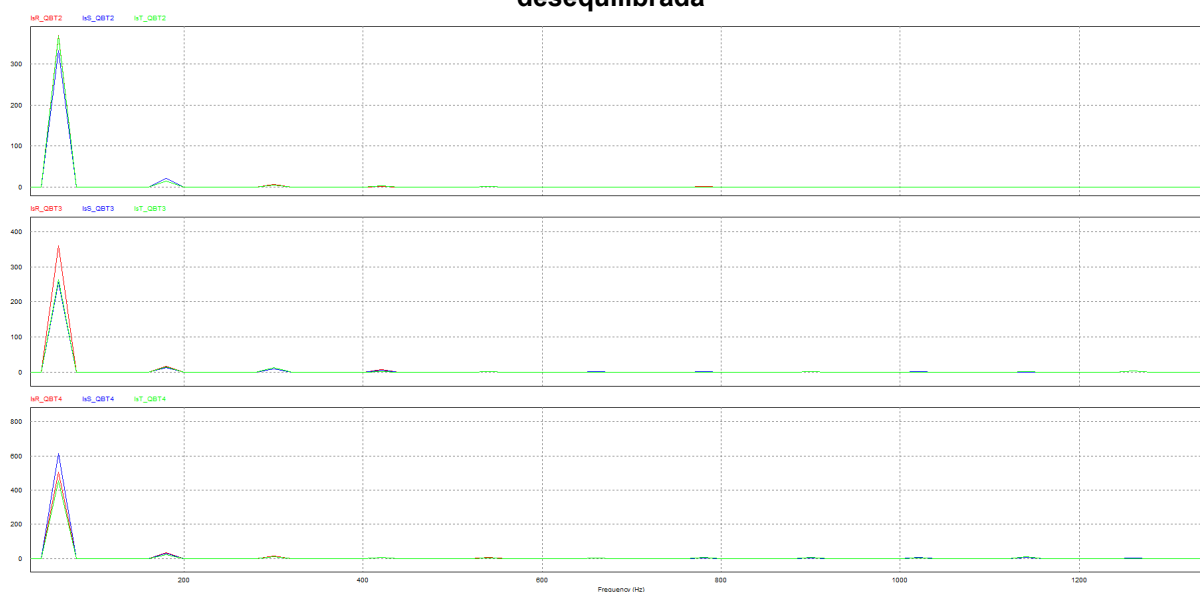
Fonte: Teodoro (2019).

Comparando as formas de onda de tensão e corrente das Figuras 28 e 29, observa-se que as formas de onda do QGBT-2 permaneceram praticamente inalteradas ao longo desses cinco anos. No entanto, as formas de onda de tensão e corrente do QGBT-3 e QGBT-4 apresentam uma diminuição perceptível nas distorções, indicando alterações no perfil de consumo da instalação. Além disso, os valores de THDi deste ano são menores do que os valores do ano de 2018, conforme apresentado nas Tabelas 41 e 43.

4.1.2.1.1 Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs

A análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente é fundamental para avaliar a qualidade de energia em cada QGBT. A Figura 30 apresenta o espectro harmônico da corrente das fases R, S e T de cada QGBT.

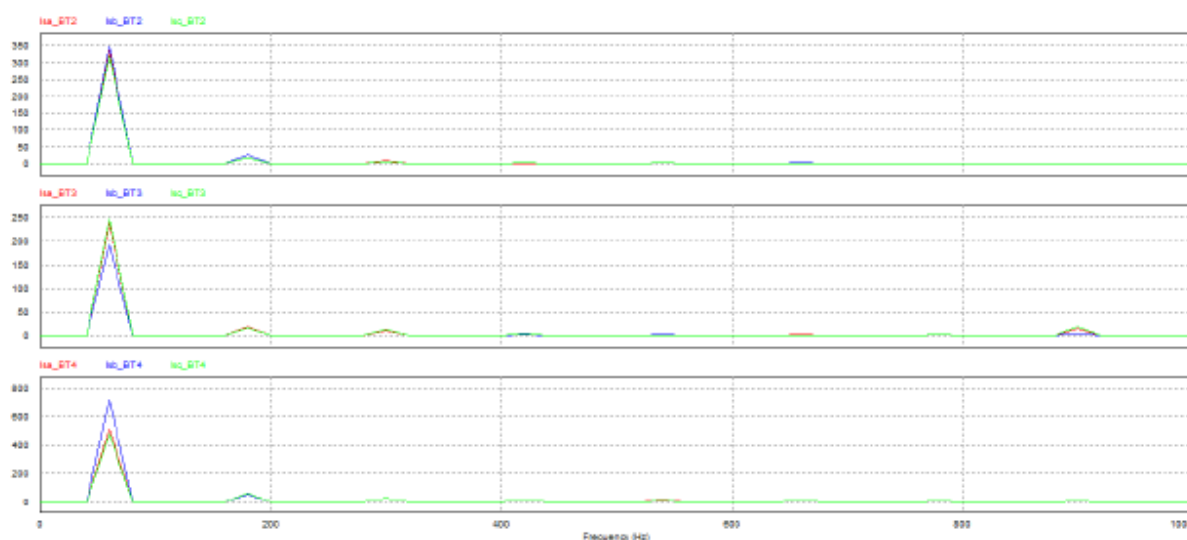
Figura 30 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, para planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 31 apresenta o espectro harmônico da corrente das fases R, S e T de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 31 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019



Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que a harmônica da corrente fundamental apresentou um aumento de amplitude em todos os QGBTs. Além disso, tanto a 3ª quanto a 5ª harmônica mantiveram valores significativos em 2018 e 2023.

Para uma melhor análise, após a obtenção da FFT, foram realizadas as verificações das amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares em cada fase dos QGBTs, apresentadas na Tabela 45.

Tabela 45 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta desequilibrada

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	Fase	R	S	T	Fase	R
Componente harmônica de corrente	1ª	368,033	331,977	367,419	360,466	255,453	262,427	505,610	613,975	455,525
	3ª	15,193	21,491	14,915	17,190	13,246	16,507	35,518	31,634	24,667
	5ª	7,110	5,496	5,547	13,996	9,385	12,950	14,835	12,755	11,062
	7ª	3,001	3,244	3,146	8,643	5,920	2,704	9,261	7,435	8,527
	9ª	2,245	2,793	2,632	2,787	2,144	2,663	5,772	4,611	3,698
	11ª	1,072	1,309	1,335	1,903	1,603	1,468	4,261	2,913	2,414
	13ª	1,698	0,590	1,243	3,276	1,863	0,801	5,398	2,591	7,237
	15ª	0,870	1,056	1,145	2,095	2,393	1,580	4,456	2,794	5,941
	17ª	0,416	0,304	0,360	2,646	2,677	1,343	6,453	6,350	1,770
	19ª	0,484	0,677	0,335	1,045	1,421	3,370	5,616	6,656	0,126
	21ª	0,368	0,402	0,016	3,955	4,828	4,967	2,194	2,041	1,525
	23ª	0,387	0,287	0,026	2,940	1,800	2,528	0,215	0,370	0,252
	25ª	0,003	0,467	0,409	1,083	0,228	0,379	0,101	0,351	0,448

Fonte: Elaboração própria (2025).

Podemos observar que as harmônicas de 3ª e 5ª ordem apresentam valores elevados, especialmente no QGBT-4, o que indica a possível necessidade de correção de distorção harmônica para esse QGBT.

A Tabela 46 apresenta os valores de amplitude das correntes harmônicas de ordens ímpares obtidos via simulação, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 46 – Amplitude das correntes harmônicas obtidas pela simulação da planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1ª	238,17	245,66	226,25	168,34	136,10	173,29	364,16	511,24	341,81
3ª	11,80	17,20	11,91	12,69	11,43	11,32	36,58	36,64	39,65
5ª	5,76	4,56	3,57	7,64	7,86	8,83	16,27	17,00	14,87
7ª	0,78	1,82	1,62	2,44	2,12	2,96	11,26	12,16	10,63
9ª	1,36	1,91	1,66	1,22	0,79	0,19	6,10	3,33	3,00
11ª	0,88	1,44	0,70	0,79	0,49	0,42	8,76	8,80	8,10
13ª	0,55	0,53	0,57	1,53	1,05	1,11	2,36	2,21	2,24
15ª	0,44	0,74	0,28	10,21	3,40	13,37	1,38	1,34	2,02

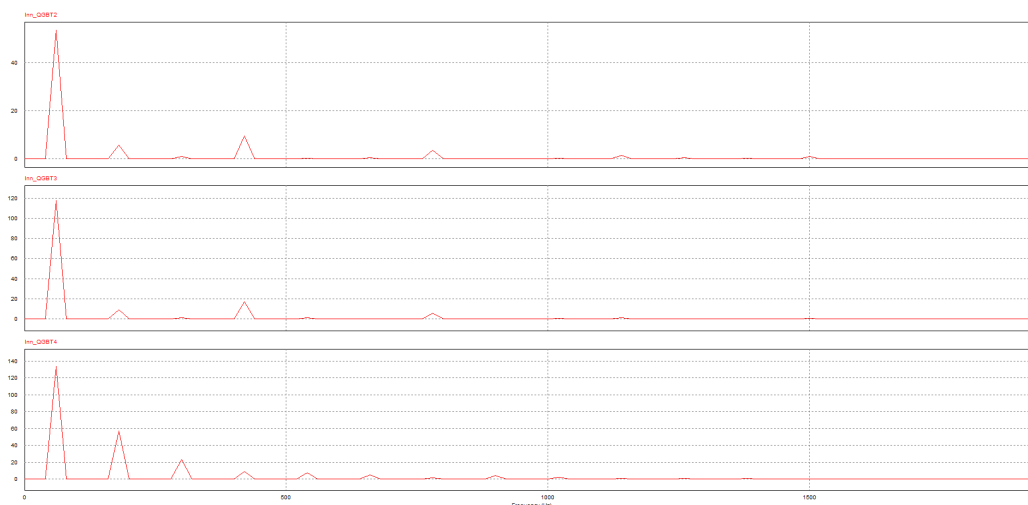
Fonte: Teodoro (2019).

Nota-se o aumento expressivo dos valores das harmônicas da corrente fundamental nos três QGBTs. Assim como observado nas amplitudes de 2023, a 3ª harmônica também apresentou valores elevados em 2018, especialmente no QGBT-4. Também é possível observar um aumento significativo na componente harmônica de 11ª ordem no QGBT-4. Segundo Teodoro (2019), isso ocorre devido à ressonância entre o banco de capacitores instalado e a impedância da fonte.

4.1.2.1.2 Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs

A corrente no condutor neutro pode ser afetada significativamente pela presença de componentes harmônicas, principalmente as de ordem ímpar múltiplas de três. Por meio da simulação, foi obtido o espectro harmônico das componentes de corrente no condutor de neutro de cada QGBT, apresentado na Figura 32.

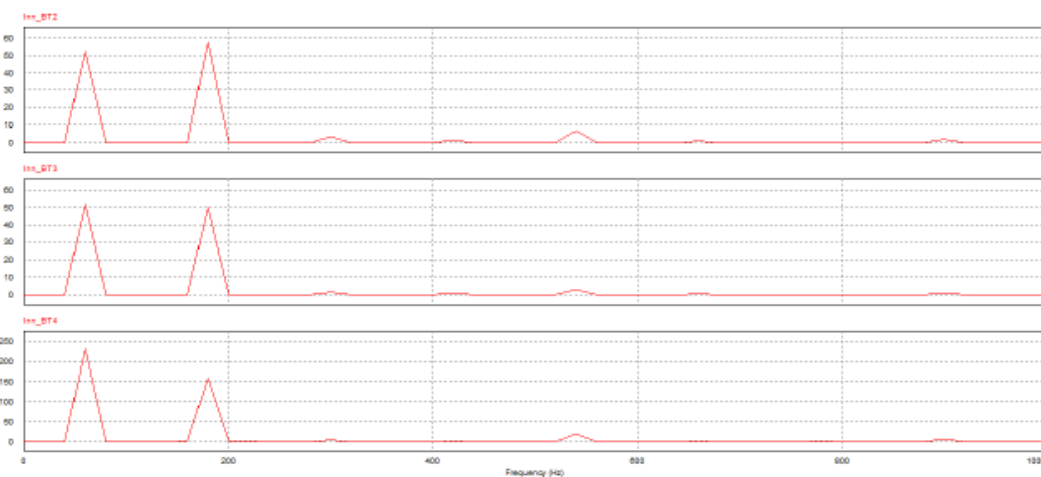
Figura 32 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT para a planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 33 apresenta o espectro harmônico das componentes de corrente no condutor de neutro de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 33 – Espectro harmônico da corrente no condutor neutro em cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019, para a planta desequilibrada



Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se, pelo espectro harmônico da corrente no condutor neutro de cada QGBT, que a amplitude da corrente da harmônica de 3ª ordem em 2023 é consideravelmente menor em comparação a 2018. Isso pode ter ocorrido devido a mudanças no perfil de carga da instalação ou até mesmo a uma maior distribuição

das cargas monofásicas entre as fases, resultando em um menor desequilíbrio e, consequentemente, em uma redução das correntes harmônicas de 3ª ordem.

Para obter uma análise mais detalhada, foram obtidos os valores de amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT. A Tabela 47 apresenta os resultados obtidos por meio de simulação.

Tabela 47 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, para a planta desequilibrada

Componente harmônica	QGBT-2	QGBT-3	QGBT-4
1ª	53,400	117,551	134,082
3ª	5,769	9,232	57,739
5ª	0,957	1,414	23,328
7ª	9,370	17,012	8,954
9ª	13,565	1,366	7,571
11ª	0,404	0,273	4,809
13ª	3,523	5,644	1,613
15ª	0,0646	0,450	4,331
17ª	0,0770	0,476	2,128
19ª	1,487	1,411	0,429
21ª	0,414	0,158	0,552
23ª	0,305	0,102	0,331
25ª	0,871	0,729	0,131

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se a predominância da harmônica de 3ª ordem, especialmente elevada no QGBT-4, indicando a presença de cargas monofásicas não lineares, já que as harmônicas de ordem ímpar múltiplas de 3 se somam no neutro em sistemas trifásicos. A harmônica de 7ª ordem elevada no QGBT-3 pode sugerir a interação entre harmônicas de fase e neutro, indicando possível desbalanceamento ou ressonância. O QGBT-2, por sua vez, apresenta níveis mais moderados, mas ainda com destaque para a harmônica de 9ª ordem, o que reforça a presença de cargas não lineares. Dessa forma, a elevada corrente harmônica no neutro, principalmente de 3ª ordem, evidencia a necessidade de corrigir as distorções causadas por cargas monofásicas.

A Tabela 48 apresenta os resultados obtidos para os valores de amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, com

base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 48 – Amplitude das correntes harmônicas do condutor neutro para cada fase de cada QGBT, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019, para planta desequilibrada

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT					
	2		3		4	
	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b
1 ^a	62,40	36,96	53,53	36,77	158,04	164,36
3 ^a	41,11	40,84	36,03	35,42	115,78	112,85
5 ^a	3,04	2,54	4,01	0,87	7,38	1,75
7 ^a	1,32	1,16	2,05	0,66	3,85	0,95
9 ^a	5,42	4,91	2,54	2,19	13,46	12,17
11 ^a	0,57	0,71	0,30	0,30	1,70	0,40
13 ^a	0,73	0,08	0,29	0,16	1,09	0,14
15 ^a	1,58	1,44	1,09	0,77	3,34	3,26

Fonte: Teodoro (2019).

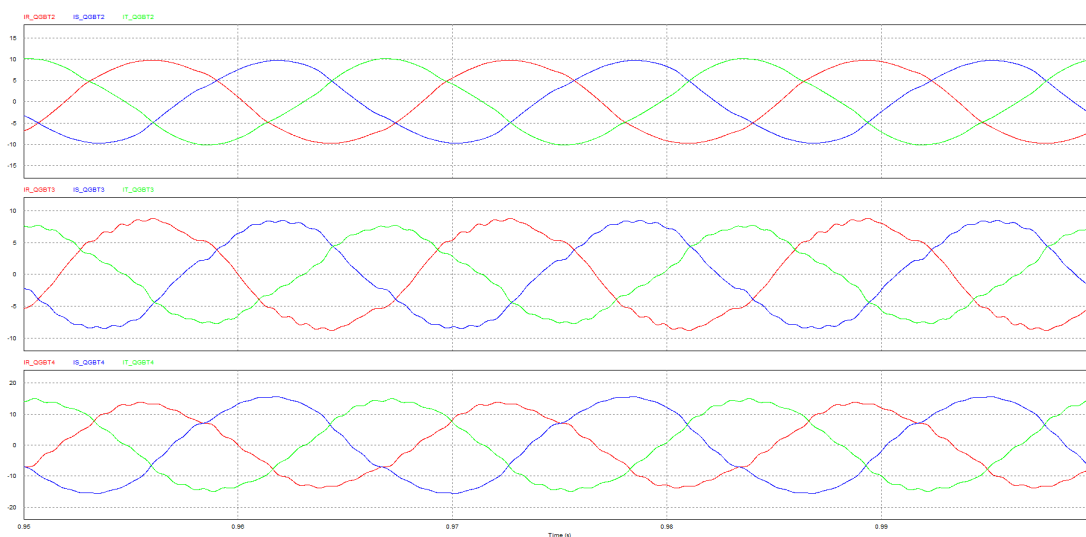
Observa-se que entre 2018 e 2023, houve uma redução significativa nas correntes harmônicas do condutor neutro, principalmente no QGBT-4, onde a 3^a harmônica teve seu valor reduzido significativamente. Essa redução sugere uma possível diminuição da carga não linear conectada ao sistema ao longo dos anos ou a redistribuição de cargas, resultando em um menor acúmulo de correntes harmônicas de ordem tripla no neutro. Nos QGBT-2 e QGBT-3, a queda foi menos significativa, mas ainda perceptível, indicando que a distorção harmônica do sistema como um todo diminuiu. A análise reforça que, mesmo sem a implementação de medidas corretivas, a alteração no perfil das cargas conectadas parece ter contribuído para a redução das harmônicas.

4.1.2.1.3 Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores

Como já comentado anteriormente, a análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores tem o objetivo de avaliar o comportamento das distorções harmônicas antes da transformação de tensão. Assim, é possível determinar se a origem das correntes harmônicas é exclusivamente das cargas conectadas aos QGBTs ou se há também contribuições vindas da rede de alimentação.

A Figura 34 apresenta as formas de onda das correntes de linhas vistas no lado de alta tensão dos transformadores.

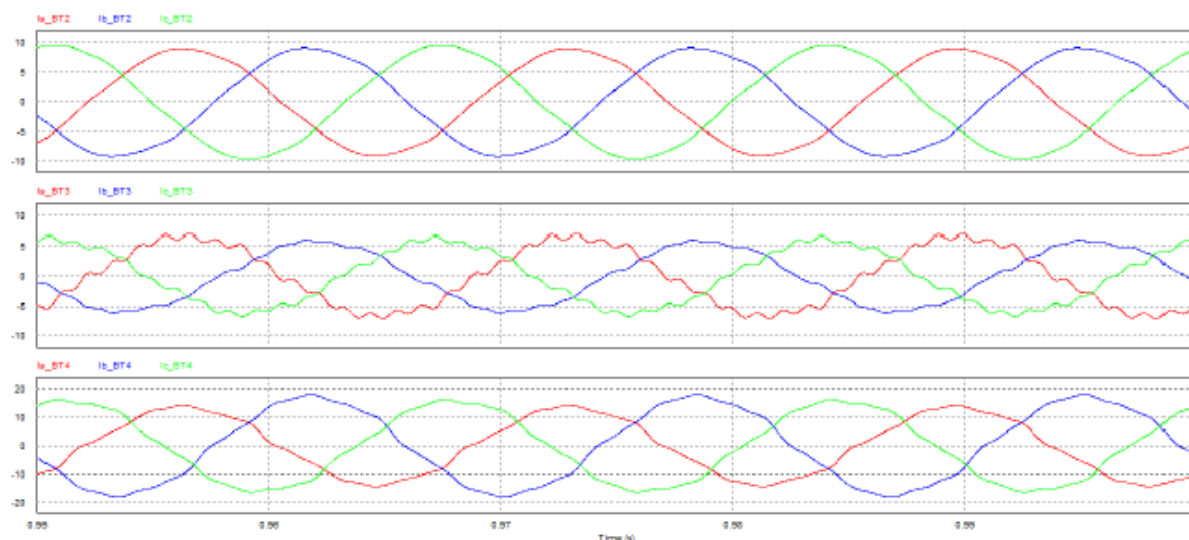
Figura 34 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores para a planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 35 apresenta as formas de onda das correntes de linhas vistas no lado de alta tensão dos transformadores, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Figura 35 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores, para a planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019



Fonte: Teodoro (2019).

É possível observar que as formas de onda de corrente de 2023 apresentam distorção um pouco mais acentuada no QGBT-4, em comparação com as formas de onda de 2018. Em compensação, as formas de onda do QGBT-3 estão mais atenuadas em 2023, em comparação com as de 2018.

A Tabela 49 apresenta os valores de THDi no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação.

Tabela 49 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs para planta desequilibrada

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
THDi	4,555	7,232	6,300	5,638	6,828	6,806	5,604	7,745	4,156

Fonte: Elaboração própria (2025).

Novamente, é analisado que o comportamento dos transformadores atenua as harmônicas de 3ª ordem e seus múltiplos, conforme observado na comparação dos valores da Tabela 41. A menor distorção harmônica de corrente no lado de alta tensão deve-se à conexão Dyn1, que proporciona um caminho para essas componentes. Esses resultados reforçam que as cargas no lado de baixa tensão são as principais responsáveis pela geração de harmônicos no sistema.

A Tabela 50 apresenta os valores de THDi no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019.

Tabela 50 – Valores de THDi vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, para a planta desequilibrada, com base nas medições efetuadas em 2018 na subestação, conforme trabalho desenvolvido em 2019

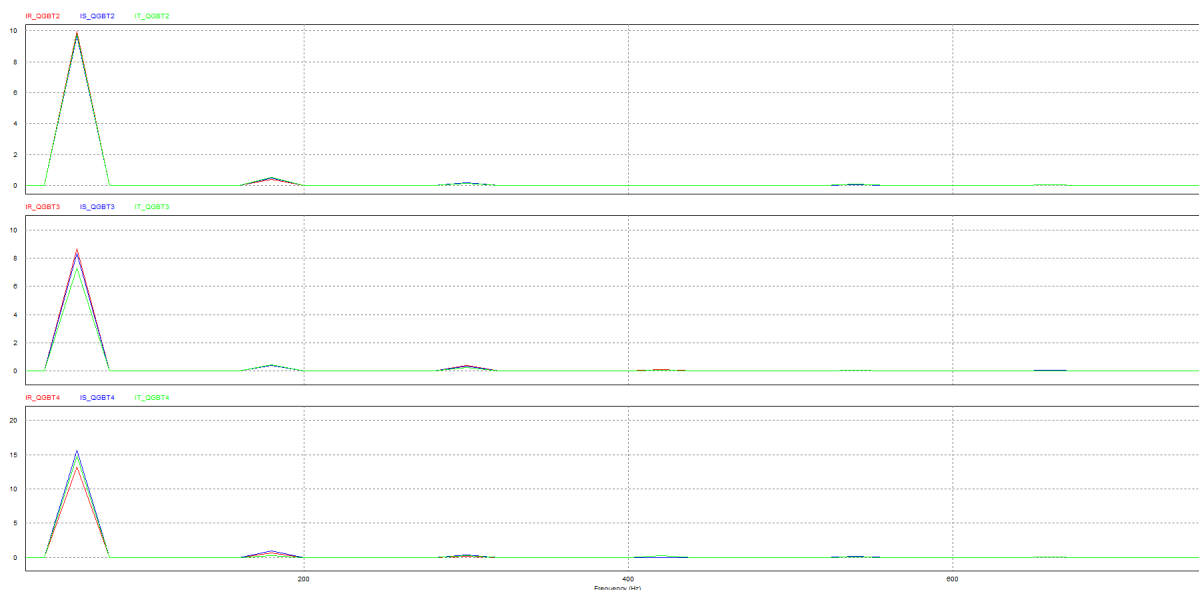
QGBT	Fase	THD_i (%)
2	R	2,17
	S	2,66
	T	2,34
3	R	9,52
	S	6,15
	T	8,34
4	R	5,93
	S	5,04
	T	5,20

Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que os valores de THDi dos QGBT-3 e QGBT-4 são menores no ano de 2023 em comparação ao ano de 2018. No entanto, os valores do QGBT-2 são menores no ano de 2018 em relação ao ano de 2023.

A Figura 36 apresenta os espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores.

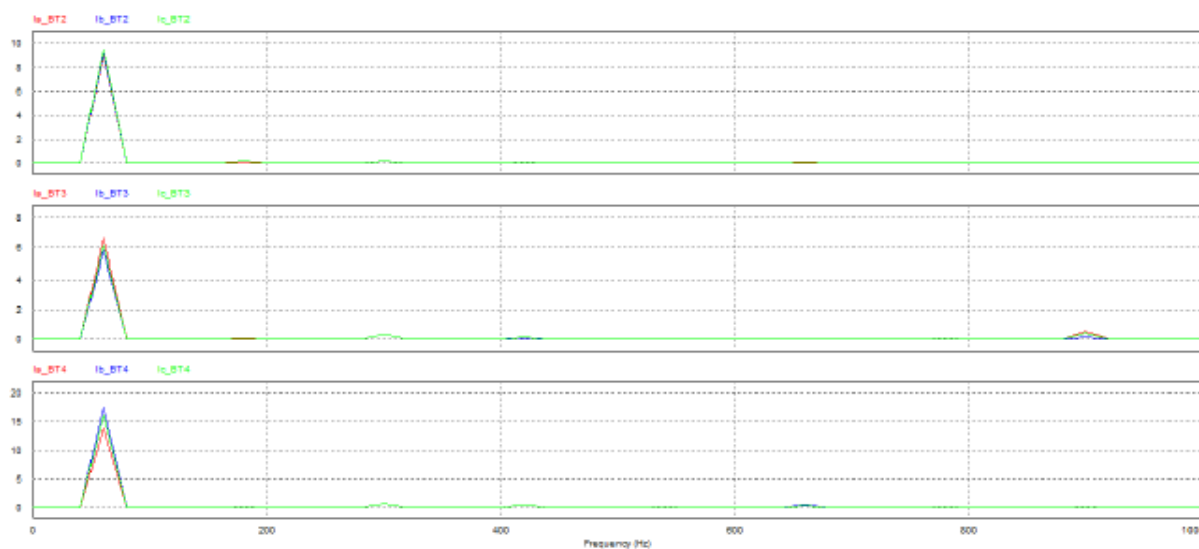
Figura 36 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores para a planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 37 apresenta os espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores, baseado nos valores medidos em 2018.

Figura 37 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores, baseado nos valores medidos em 2018



Fonte: Teodoro (2019).

Observa-se que os espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores não tiveram variações significativas ao longo destes cinco anos.

A Tabela 51 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação.

Tabela 51 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, para a planta desequilibrada

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	1ª	9,997	9,662	9,808	8,662	8,345	7,291	13,252	15,588	14,743
	3ª	0,406	0,500	0,523	0,417	0,410	0,457	0,642	0,921	0,303
	5ª	0,180	0,176	0,146	0,402	0,332	0,268	0,151	0,394	0,263
	7ª	0,00601	0,00446	0,00820	0,0999	0,0450	0,0608	0,280	0,0296	0,251
	9ª	0,0655	0,0683	0,0782	0,0686	0,0668	0,0721	0,112	0,151	0,0459
	11ª	0,0344	0,0309	0,0498	0,0498	0,0504	0,0364	0,0493	0,110	0,0661

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 52 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação, baseado nos valores obtidos em 2018.

Tabela 52 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, baseado nos valores obtidos em 2018, para a planta desequilibrada

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1ª	6,38	6,49	6,72	4,70	4,14	4,36	9,79	12,45	11,48
3ª	0,01	0,09	0,09	0,02	0,02	0,01	0,05	0,01	0,06
5ª	0,13	0,13	0,12	0,23	0,21	0,23	0,42	0,46	0,45
7ª	0,04	0,04	0,04	0,08	0,06	0,07	0,30	0,33	0,31
9ª	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,04	0,02
11ª	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,23	0,25	0,23
13ª	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,03	0,06	0,06	0,06
15ª	0,00	0,01	0,01	0,37	0,11	0,27	0,04	0,01	0,03

Fonte: Teodoro (2019).

É possível observar que os valores das componentes da harmônica de 3ª ordem tiveram um aumento em relação aos valores do ano de 2018. Além disso,

podemos observar que as correntes harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas tem somente uma parcela aprisionadas no delta dos transformadores, devido ao fato do sistema ser desequilibrado.

4.1.2.2 Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022

A avaliação dos níveis harmônicos de corrente na planta elétrica equilibrada seguiu a norma IEEE Std 519-2022, considerando o PCC na entrada de cada QGBT para verificar a conformidade com os limites aceitáveis. A Tabela 2 define esses limites, exigindo o cálculo do parâmetro I_{sc}/I_L , que depende da corrente de curto-circuito. Para isso, são utilizadas as Equações 24, 28 e 29, que determinam a impedância de base, a impedância do transformador e a corrente de curto-circuito, respectivamente.

A Tabela 53 apresenta os resultados dos cálculos realizados para determinação da corrente de curto-circuito nos QGBTs.

Tabela 53 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L com inserção dos filtros

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
$Z_B (\Omega)$	0,2888			0,2888			0,2888		
$Z_{pu} (\%)$	5,83			7,30			7,30		
$Z_{trafo} (\Omega)$	0,0168			0,02108			0,02108		
$I_{sc} (kA)$	13030,384			10406,458			10406,458		
$I_L (A)$	260,238	234,743	259,804	254,888	180,633	185,564	357,520	434,146	322,105
I_{sc}/I_L	50,071	55,509	50,155	40,828	57,611	56,080	29,107	23,970	32,308

Fonte: Elaboração própria (2025).

A partir da determinação do parâmetro I_{sc}/I_L para cada QGBT, concluímos que, para o QGBT-2 e QGBT-3, utilizaremos a faixa de valores $50 < I_{sc}/I_L < 100$, conforme estipulado pela norma, e para o QGBT-4, a faixa será $20 < I_{sc}/I_L < 50$. Assim, foi calculado para cada fase dos respectivos QGBTs, por meio dos dados obtidos via simulação, o maior valor percentil medido entre as harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme apresentado na Tabela 54.

Tabela 54 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, para a planta desequilibrada

QGBT	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
2	6,618	0,856	0,320	0,149	0,000	6,666
	9,640	0,770	0,380	0,234	0,000	9,664
	6,346	0,840	0,190	0,158	0,000	6,384
3	9,428	1,991	2,232	1,229	0,000	3,852
	9,681	2,409	3,309	1,005	0,000	5,740
	11,517	1,436	3,583	1,377	0,000	6,521
4	11,254	2,917	2,471	0,066	0,000	11,687
	8,138	1,833	2,172	0,117	0,000	8,469
	8,906	3,052	0,731	0,159	0,000	9,398

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao comparar os valores obtidos e os limites estipulados pela Tabela 2, observou-se que os valores do QGBT-2 estão dentro dos parâmetros estabelecidos. No entanto, o QGBT-3 e o QGBT-4 excedem os limites definidos pela norma. O QGBT-3 ultrapassa o valor máximo na faixa de $3 \leq h \leq 11$, enquanto o QGBT-4 ultrapassa tanto essa faixa quanto o valor máximo de TDD. Dessa forma, será necessário realizar o dimensionamento de filtros para o QGBT-3 e QGBT-4, a fim de atender aos limites estabelecidos pela norma e reduzir as componentes harmônicas excedentes.

A Tabela 55 apresenta os valores percentuais das componentes harmônicas de corrente baseado nos dados obtidos em 2018, é possível perceber um aumento significativo nos valores do ano de 2018 para o ano de 2023, especialmente nas faixas de $17 \leq h \leq 23$ e $23 \leq h \leq 35$. Além disso, observa-se que apenas o QGBT-4 ultrapassou os limites permitidos. Nota-se, portanto, que ao longo desses cinco anos houve um aumento na influência de cargas não-lineares na instalação, o que causou a necessidade de correção das distorções também no QGBT-3.

Tabela 55 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, baseado nos valores obtidos em 2018, para a planta desequilibrada

QGBT	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
2	4,9%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%
	7,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	7,3%
	5,3%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%
3	7,5%	6,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,8%
	8,3%	7,5%	0,0%	0,0%	0,0%	10,6%
	6,5%	7,7%	0,0%	0,0%	0,0%	11,4%
4	10,0%	2,4%	0,0%	0,0%	0,0%	11,7%
	7,1%	1,7%	0,0%	0,0%	0,0%	8,4%
	11,5%	2,3%	0,0%	0,0%	0,0%	12,9%

Fonte: Teodoro (2019).

4.1.2.3 Projeto do filtro

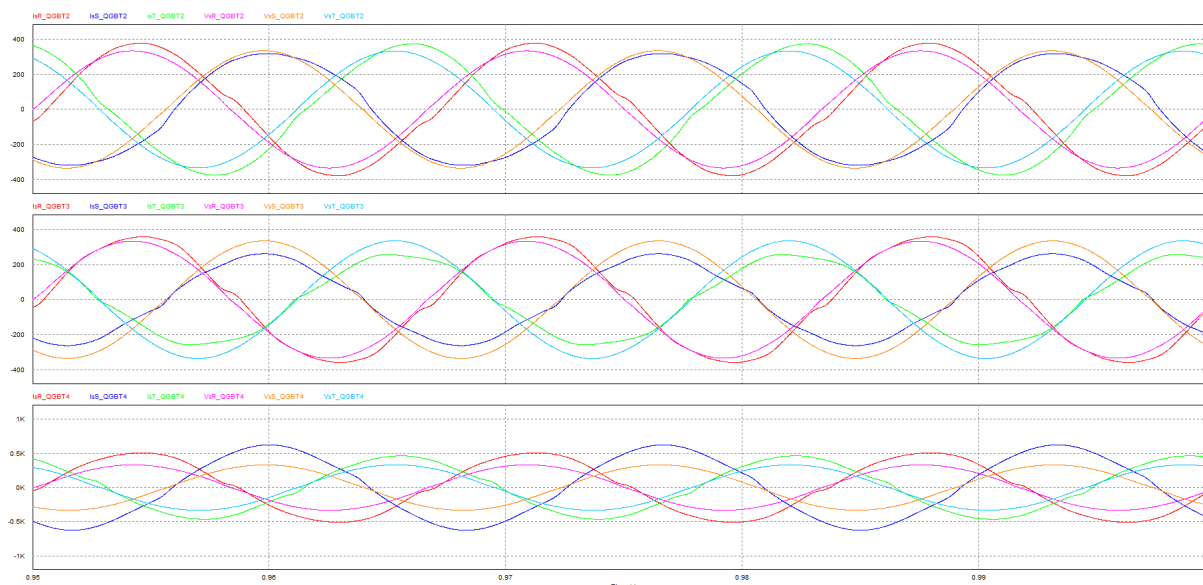
O projeto do filtro passivo foi elaborado para os transformadores trifásicos a seco de 500 kVA (380/220 V) dos QGBT-3 e QGBT-4, com o intuito de atenuar as componentes de terceira harmônica. Para o sistema desequilibrado foi utilizada a mesma unidade de filtragem projetada na seção 4.1.1.3.

4.1.2.3.1 Análise da THDi e demais grandezas nos QGBTs

Para avaliar a THDi e demais grandezas após a inserção do filtro *shunt*, foi realizada a simulação da planta elétrica desequilibrada, conforme o modelo apresentado no Apêndice D.

A Figura 38 apresenta as formas de onda das componentes de tensão e de corrente dos respectivos QGBTs, após a inserção dos filtros.

Figura 38 – Corrente e tensão dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros da planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 56 apresenta os valores das grandezas dos respectivos QGBTs, obtidos pela simulação da planta desequilibrada com a inserção dos filtros.

Tabela 56 – Valores das grandezas dos respectivos QGBTs com a inserção dos filtros, obtidos via simulação da planta desequilibrada

QGBT	Fase	V_{ef1} (V)	I_{ef1} (A)	FP	THDi (%)	P (kW)	S (kVA)
2	R	235,391	260,275	0,988	4,842	60,638	61,336
	S	235,456	234,763	0,988	6,848	54,714	55,406
	T	235,141	259,834	0,98	4,51	59,922	61,161
3	R	235,524	253,434	0,995	4,528	59,444	59,751
	S	236,264	180,494	0,999	4,407	42,64	42,686
	T	236,036	184,188	0,997	5,131	43,394	43,532
4	R	235,052	357,499	0,997	3,95	83,871	84,097
	S	234,299	434,233	0,996	2,736	101,4	101,782
	T	235,173	322,018	0,997	3,548	75,547	75,78

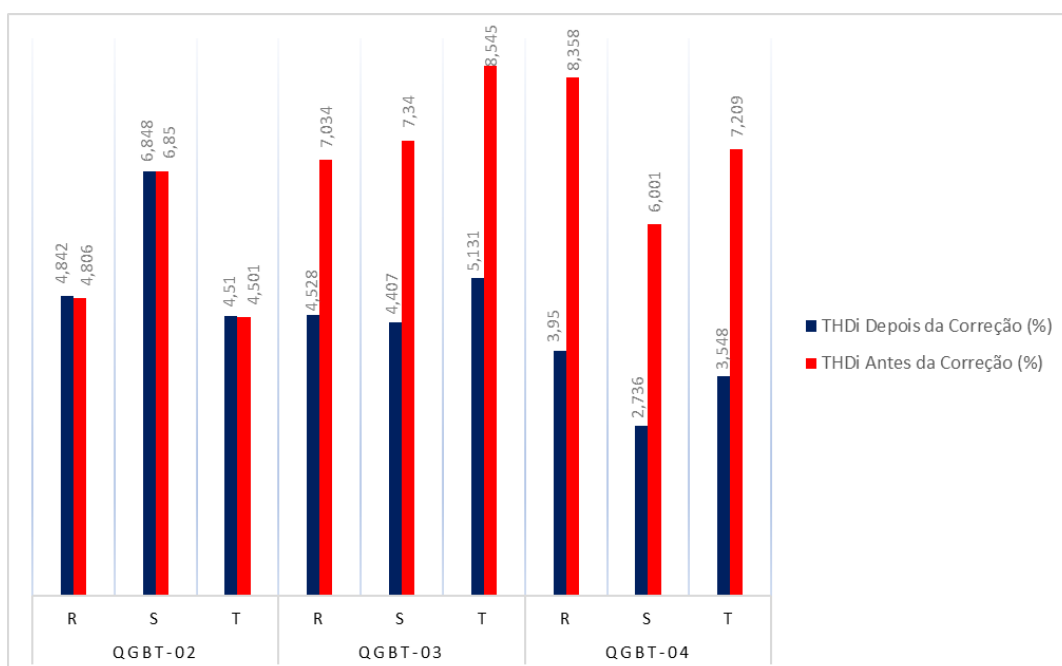
Fonte: Elaboração própria (2025).

Comparando os valores das grandezas antes da inserção do filtro, apresentados na Tabela 41, verifica-se que os valores de THDi do QGBT-3 foram reduzidos em aproximadamente 35%, enquanto os do QGBT-4 sofreram uma diminuição de cerca de 53%. Além disso, observa-se que o caminho de baixa

impedância criado pelos filtros *shunt* não provocou alterações nos valores de THDi do QGBT-2.

A Figura 39 apresenta uma comparação entre os valores de THDi de cada QGBT antes e após a correção com os filtros, em que se torna ainda mais evidente a diminuição dos valores de THDi dos QGBT-3 e QGBT-4.

Figura 39 – Comparativo entre os valores de THDi dos respectivos QGBTs antes e depois da inserção dos filtros na planta desequilibrada

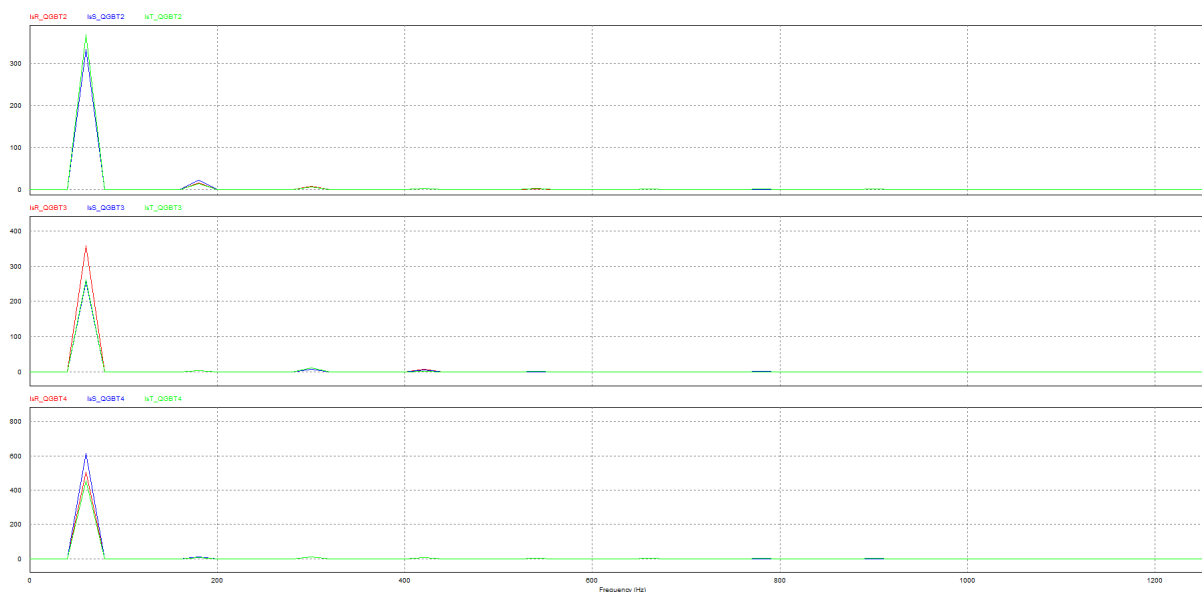


Fonte: Elaboração própria (2025).

4.1.2.3.2 Análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBTs com filtros shunt

Foi realizada a análise das amplitudes das componentes harmônicas de corrente de cada fase dos QGBT após a inserção dos filtros, apresentada na Figura 40, com o objetivo de verificar a efetividade dos filtros na atenuação das distorções harmônicas, avaliando a redução dos harmônicos predominantes.

Figura 40 – Amplitudes das componentes harmônicas de corrente com filtros *shunt* na planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma redução significativa nas amplitudes das componentes harmônicas de corrente nos QGBT-3 e QGBT-4, com destaque para as harmônicas de terceira e quinta ordem. Para uma avaliação mais precisa dos resultados, a Tabela 57 apresenta os valores das amplitudes das componentes harmônicas de corrente em cada fase dos respectivos QGBTs.

Tabela 57 – Valores das amplitudes das componentes harmônicas de corrente em cada fase dos respectivos QGBTs com inserção dos filtros na planta desequilibrada

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	3 ^a	15,328	21,479	14,958	4,417	3,939	4,744	10,228	9,611	8,490
	5 ^a	7,122	5,512	5,552	12,525	8,372	11,700	13,261	11,388	10,489
	7 ^a	3,012	3,249	3,129	8,002	5,663	2,974	7,975	6,545	6,624
	9 ^a	2,263	2,802	2,635	2,218	1,564	2,129	4,451	3,571	3,345
	11 ^a	1,087	1,324	1,336	1,279	1,105	1,033	2,954	1,811	2,128
	13 ^a	1,729	0,599	1,208	2,568	1,776	1,232	2,683	1,447	3,335
	15 ^a	0,905	1,070	1,130	1,025	1,110	0,843	1,473	1,086	2,896
	17 ^a	0,483	0,358	0,615	0,711	0,896	0,474	1,146	1,005	0,914
	19 ^a	0,424	0,639	0,415	0,387	0,528	0,420	0,669	0,602	1,241
	21 ^a	0,379	0,424	0,011	0,426	0,366	0,265	0,296	0,295	0,188
	23 ^a	0,352	0,264	0,006	0,341	0,197	0,336	0,314	0,296	0,009
	25 ^a	0,007	0,456	0,411	0,005	0,367	0,376	0,006	0,312	0,300

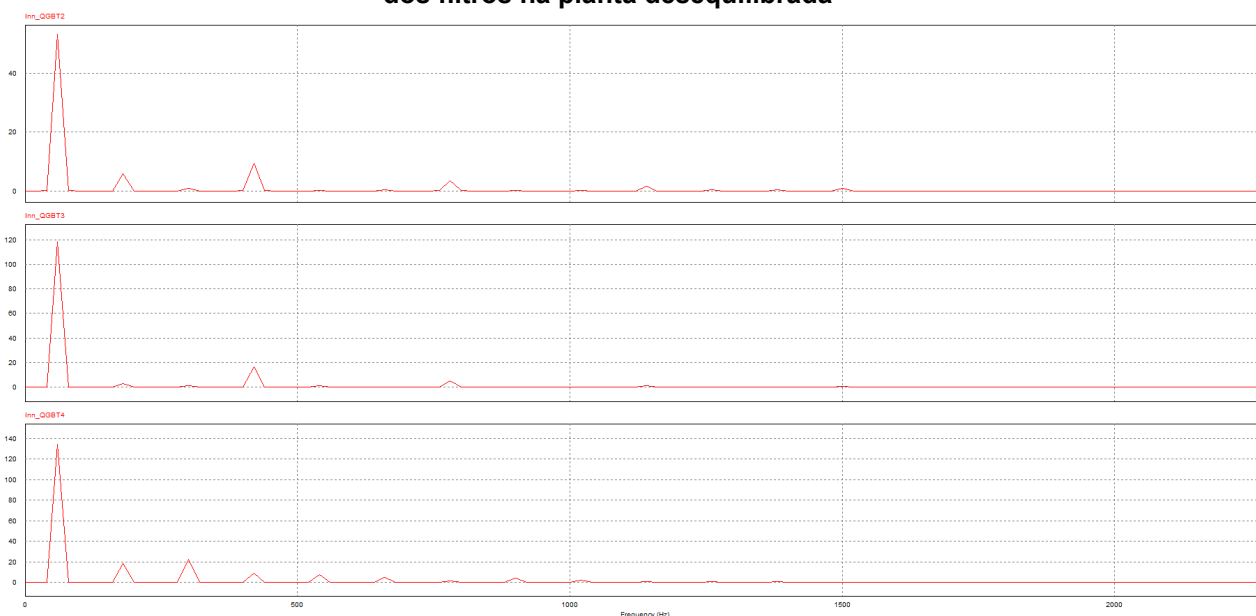
Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma redução expressiva nas amplitudes das componentes harmônicas de corrente de 3ª ordem nos QGBT-3 e QGBT-4, evidenciando o impacto positivo da inserção dos filtros *shunt*, mesmo em um cenário de planta desequilibrada.

4.1.2.3.3 *Análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs com filtros shunt*

A análise da amplitude das componentes harmônicas de corrente no neutro dos QGBTs com filtros *shunt* tem como foco avaliar como a aplicação desses filtros afeta a corrente no condutor de neutro. A Figura 41 apresenta o espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros *shunt* na planta.

Figura 41 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção dos filtros na planta desequilibrada



Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a análise da FFT, foram realizadas verificações das amplitudes das harmônicas de ordem múltipla de três na corrente do condutor de neutro dos QGBTs, conforme apresentado na Tabela 58.

Tabela 58 – Valores das amplitudes das harmônicas de ordem múltipla de três na corrente do condutor de neutro dos QGBTs com filtros na planta desequilibrada

Componente harmônica de corrente	QGBT-2		QGBT-3		QGBT-4	
	Planta desequilibrada	Planta desequilibrada com filtros	Planta desequilibrada	Planta desequilibrada com filtros	Planta desequilibrada	Planta desequilibrada com filtros
1 ^a	53,400	53,408	117,551	118,160	134,082	134,654
3 ^a	5,769	5,777	9,232	2,988	57,739	18,519
5 ^a	0,957	0,958	1,414	1,340	23,328	22,380
7 ^a	9,370	9,371	17,012	16,474	8,954	8,713
9 ^a	13,565	0,135	1,366	1,329	7,571	7,349
11 ^a	0,404	0,403	0,273	0,256	4,809	4,663
13 ^a	3,523	3,530	5,644	5,514	1,613	1,585
15 ^a	0,0646	0,0658	0,450	0,454	4,331	4,121
17 ^a	0,0770	0,0826	0,476	0,448	2,128	1,966
19 ^a	1,487	1,475	1,411	1,316	0,429	0,467
21 ^a	0,414	0,420	0,158	0,239	0,552	0,499
23 ^a	0,305	0,300	0,102	0,0662	0,331	0,312
25 ^a	0,871	0,872	0,729	0,733	0,131	0,123

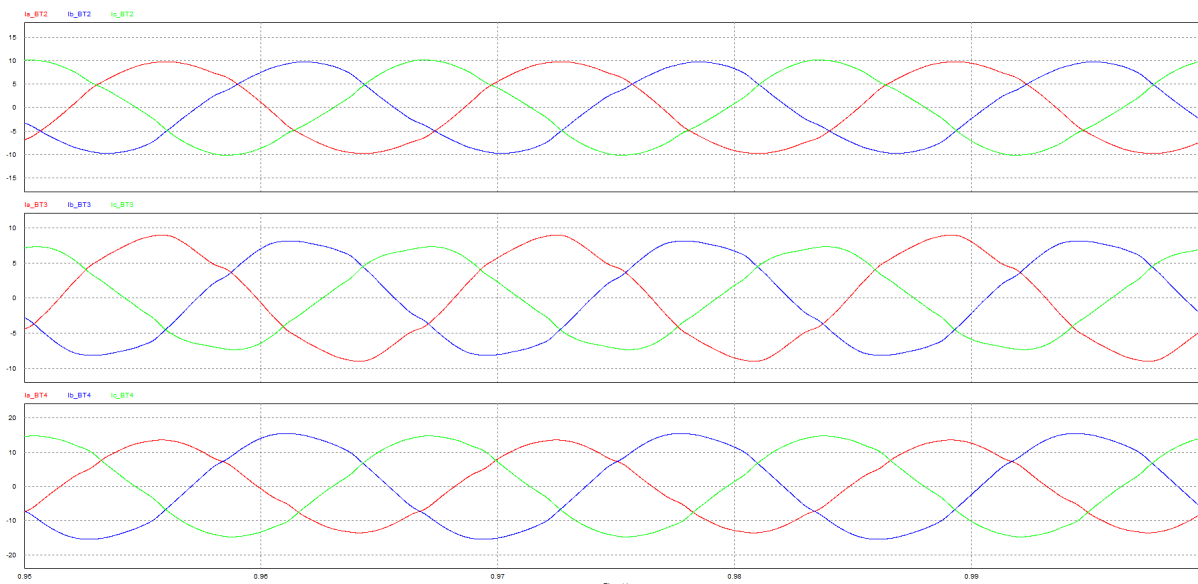
Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se uma redução significativa nas amplitudes das harmônicas de 3^a ordem para os QGBT-3 e QGBT-4, enquanto os demais valores permaneceram próximos aos registrados antes da inserção dos filtros.

4.1.2.3.4 Análise das componentes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores com filtros shunt

A Figura 42 apresenta as formas de onda das correntes vistas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs, obtidas via simulação da planta desequilibrada com a inserção dos filtros.

Figura 42 – Formas de onda das correntes no lado de alta tensão dos transformadores obtidas via simulação da planta desequilibrada com inserção dos filtros



Fonte: Elaboração própria (2025).

Comparando com a análise sem a inserção dos filtros, observa-se uma redução significativa das distorções nas formas de onda das correntes dos QGBT-3 e QGBT-4. A Tabela 59 apresenta os valores de $THDi$ obtidos do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta desequilibrada após a inserção dos filtros.

Tabela 59 – Valores de $THDi$ vistas do lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
$THDi$	4,586	5,653	5,601	4,620	3,975	4,011	2,800	2,948	2,262

Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que os valores de $THDi$ do QGBT-02 permaneceram praticamente inalterados em relação aos obtidos sem a inserção dos filtros, enquanto os QGBT-3 e QGBT-4 apresentaram uma redução. Essa diminuição se deve à mitigação das componentes harmônicas múltiplas de 3 pelos filtros *shunt* no lado de baixa tensão, o que reduz a circulação de correntes harmônicas refletidas para o lado de alta tensão, resultando em uma menor $THDi$.

A Figura 43 apresenta o espectro harmônico das correntes no lado de alta tensão dos transformadores.

Figura 43 – Espectros harmônicos das correntes de linha no lado de alta tensão dos transformadores obtidos via simulação da planta equilibrada com inserção dos filtros



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 60 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta desequilibrada com inserção dos filtros.

Tabela 60 – Valores das amplitudes das correntes harmônicas no lado de alta tensão dos transformadores dos respectivos QGBTs obtidos via simulação da planta desequilibrada com inserção dos filtros

QGBT		QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Componente harmônica de corrente	1ª	9,998	9,663	9,810	8,665	8,241	7,267	13,257	15,598	14,707
	3ª	0,409	0,502	0,523	0,112	0,102	0,136	0,211	0,264	0,0603
	5ª	0,180	0,177	0,146	0,361	0,297	0,242	0,132	0,344	0,232
	7ª	0,00565	0,00443	0,00813	0,0838	0,0386	0,0503	0,229	0,233	0,206
	9ª	0,0658	0,0687	0,0783	0,0539	0,0506	0,0562	0,0812	0,109	0,0344
	11ª	0,0345	0,0336	0,0352	0,0345	0,0337	0,0255	0,0298	0,0668	0,0415
	13ª	0,00864	0,0180	0,00991	0,0230	0,0130	0,0128	0,0944	0,0197	0,0750
	15ª	0,0274	0,0267	0,0317	0,0233	0,0284	0,0297	0,0478	0,0347	0,0337

Fonte: Elaboração própria (2025).

É possível observar que os valores das componentes da harmônica de 3ª ordem tiveram um aumento em relação aos valores do ano de 2018. Além disso, podemos observar que as correntes harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas tem somente uma parcela aprisionadas no delta dos transformadores, devido ao fato do sistema ser desequilibrado.

4.1.2.3.5 Comparação com as soluções propostas nos estudos de 2019

Com base nos dados de 2018, foram propostas soluções com filtros *shunt* 3C1L para a correção das correntes harmônicas, sendo identificada a necessidade de mitigação apenas no QGBT-4. No entanto, a análise dos dados de 2023 revelou a necessidade de estender a correção também ao QGBT-3, refletindo mudanças no perfil harmônico do sistema ao longo dos anos e evidenciando alterações na instalação. Dessa forma, as soluções propostas anteriormente não seriam suficientes para atender ao perfil da instalação em 2023.

Embora a topologia *shunt* utilizada seja diferente da 3C1L, essa distinção não afeta a comparação entre as soluções. Como já observado na planta equilibrada, Teodoro (2019) apontou que a filtragem da 3ª harmônica em seu estudo não foi suficiente para atender à norma, pois resultou no aumento da 7ª harmônica. O mesmo comportamento foi verificado na planta desequilibrada. Por outro lado, Dantas (2019) demonstrou que seus filtros foram eficazes em ambas as condições, garantindo conformidade com os limites normativos.

4.1.2.4 Avaliação dos resultados em conformidade com a IEEE Std 519-2022

A avaliação dos níveis harmônicos de corrente na planta equilibrada seguiu a norma IEEE Std 519-2022, considerando o PCC na entrada de cada QGBT. A Tabela 2 define os limites normativos, sendo necessário calcular I_{sc}/I_L para determinar a faixa aplicável. Para isso, foram calculadas as impedâncias de base e do transformador, obtendo-se a corrente de curto-circuito conforme as Equações 24, 28 e 29.

A Tabela 61 apresenta os resultados dos cálculos realizados para determinação da corrente de curto-circuito nos QGBTs.

Tabela 61 – Grandezas calculadas para obtenção do parâmetro I_{sc}/I_L com inserção dos filtros na planta desequilibrada

QGBT	QGBT-02			QGBT-03			QGBT-04		
Fase	R	S	T	R	S	T	R	S	T
Z_B (Ω)	0,2888			0,2888			0,2888		
Z_{pu} (%)	5,83			7,30			7,30		
Z_{trafo} (Ω)	0,0168			0,02108			0,02108		
I_{sc} (kA)	13030,384			10406,458			10406,458		
I_L (A)	260,2747	234,763	259,8335	253,4334	180,494	184,1879	357,499	434,2336	322,0178
I_{sc}/I_L	50,06397	55,50442	50,14899	41,0619	57,65544	56,49914	29,10905	23,96512	32,3164

Fonte: Elaboração própria (2025).

Assim como na planta equilibrada, na planta desequilibrada, os parâmetros I_{sc}/I_L para os QGBT-2 e QGBT-3 foram ajustados para a faixa de $50 < I_{sc}/I_L < 100$, enquanto para o QGBT-4, a faixa foi definida como $20 < I_{sc}/I_L < 50$. Com base nas simulações, foi calculado o maior valor percentil das harmônicas e a TDD, conforme apresentado na Tabela 62.

Tabela 62 – Valores percentuais das componentes harmônicas de corrente para comparação com os valores estipulados pela IEEE Std 519-2022, para a planta desequilibrada

QGBT	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
2	6,666	0,878	0,317	0,135	0,000	6,716
	9,637	0,784	0,378	0,224	0,000	9,661
	6,360	0,852	0,286	0,158	0,000	6,400
3	6,201	1,234	0,385	0,135	0,000	2,489
	6,103	1,403	0,621	0,231	0,000	3,461
	7,158	1,019	0,415	0,274	0,000	3,919
4	5,399	1,232	0,390	0,088	0,000	5,481
	3,860	0,633	0,286	0,099	0,000	3,894
	4,828	1,549	0,482	0,093	0,000	5,043

Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao comparar com os valores estipulados pela norma, conforme apresentados na Tabela 2, observamos que, após a correção com os filtros *shunt* implementados nos QGBT-3 e QGBT-4, todos parâmetros ficaram dentro dos limites recomendados. Assim, podemos concluir que os filtros foram eficazes na correção das distorções harmônicas em ambos os QGBTs.

5 CONCLUSÃO

O estudo comparativo realizado neste trabalho permitiu avaliar a evolução das distorções harmônicas na instalação elétrica do IFSC Câmpus Florianópolis entre os anos de 2018 e 2023. A análise demonstrou um aumento significativo de determinadas componentes harmônicas ao longo do período, refletindo as mudanças no perfil de carga da instalação.

A modelagem das plantas, tanto equilibrada quanto real, e as simulações confirmaram a necessidade de mitigação das harmônicas, evidenciando que as soluções propostas nos estudos anteriores não eram mais adequadas para a configuração atual do sistema.

O dimensionamento e a implementação de filtros passivos mostraram-se eficazes na redução dos níveis de distorção harmônica, garantindo que os valores ficassem dentro dos limites normativos estabelecidos pela IEEE Std 519-2022.

Por fim, os resultados confirmam que o projeto e a implementação dos filtros passivos foram eficazes em reduzir as distorções, reforçando a importância da análise periódica das harmônicas para garantir a qualidade da energia elétrica fornecida, prevenir sobrecargas nos condutores de neutro e assegurar o bom funcionamento dos equipamentos conectados ao sistema.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante realizar um novo estudo considerando medições atualizadas após a troca do transformador da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis, analisando o impacto dessa mudança nos níveis de distorção harmônica e verificando se a solução proposta neste trabalho para redução das harmônicas permanece eficaz.

Outra linha de pesquisa relevante seria o projeto e a implementação de filtros ativos, comparando seu desempenho com os filtros passivos utilizados neste estudo. Esse comparativo permitiria avaliar se a adoção de filtros ativos poderia oferecer maior flexibilidade, adaptabilidade às variações de carga e eficiência na redução das distorções harmônicas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021**. PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Anexo VIII: Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf. Acesso em: 05 abr. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356: Transformadores de potência - Parte 11: Transformadores do tipo seco - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.
- DANTAS, Isabela Franco. **Estudo de Correção das Distorções Harmônicas no Lado de Baixa Tensão da Subestação do IFSC Campus Florianópolis com Filtros Passivos**. 2019. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- DUPCZAK, B. S.; LAGO, J.; KASSICK, E. V.; LÚCIO, D.G.; ALENCASTRO, N.; CUNHA, R. F. Avaliação de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensão e de Corrente na Subestação do IFSC Câmpus Florianópolis. In: **Induscon - Conferência de Aplicação Industrial de Eletricidade, Conservação, Confiabilidade e Controle/Automação**. São Paulo, 2018.
- DUGAN, R. C.; MCGRANACHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality** – 2nd ed. New York. McGraw-Hill, 2003.
- FERNANDES, Ricardo A. S. *et al.* Identificação de cargas lineares e não-lineares em sistemas elétricos residencial usando técnicas para seleção de atributos e redes neurais artificiais. **Controle & Automação**, São Paulo, v. 21, n.4, p. 390-391, ago. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ca/a/M7dBKm9jr5GFhQgG8jLcD8z/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 06 abr. 2023.
- IEEE. **Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems**. IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2022), May 2022.
- KAGAN, N. *et al.* **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2009.
- KASSICK, E. V. **Harmônicas em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão**: apostila do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Florianópolis, 2016.
- LEÃO, Ruth Leão; SAMPAIO, Raimundo; ANTUNES, Fernando. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2014.
- MARQUES, Jeferson Prates. **Modelagem e Análise da Distorção Harmônica de Computadores em Instalações Elétricas**. 2011. 100 f. TCC (Graduação) - Curso

de Engenharia Elétrica, Fundação Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2011. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/966/1/Modelagem%20e%20an%C3%A1lise%20da%20distor%C3%A7%C3%A3o%20harm%C3%B4nica%20de%20computadores%20em.pdf>. Acesso em: 12 maio 2023.

MOSER, Odirlei Hercillio; GONÇALVES, Bruno. **Compensação angular para proteção diferencial de transformadores**. Anuário do Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Faculdade Anhangüera, Jaraguá do Sul, 2010. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/20983/1/07%20-%20Compensa%C3%A7%C3%A3o%20Angular%20para.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 09 fevereiro 2025.

NIELSON, Rafael. **Harmônicos triplos no sistema de distribuição e uma proposta de mitigação**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3609>. Acesso em: 12 maio 2023.

OLIVEIRA, Roniere Henrique de. **Estudo da Viabilidade da Utilização de Filtros Passivos na Filtragem de 3ª Harmônica de Corrente em Transformadores de Distribuição**. 2010. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94685>. Acesso em: 10 maio 2023.

OLIVEIRA, Renato Antônio de; QUITO, Tercius Murilo. **Projeto e Análise de um Filtro Passivo de Correntes Harmônicas para um Computador de Uso Pessoal**. 2006. 158 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/864>. Acesso em: 20 maio 2023.

ORTMANN, Márcio Silveira. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação**. 2008. 241 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/92007>. Acesso em: 12 maio 2023.

PIRES, Igor Amariz. **Medidas de mitigação de harmônicos**. O Setor Elétrico, 2010. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2011/01/ed59_fasc_harmonicos_capXII.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

QUADROS, M. A. **Filtragem Passiva de Harmônicas em Instalações Elétricas**. 1999. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

QUADROS, M. A.; KASSICK, E. V. Uso de filtros passivos em topologia híbrida (série e paralela) para supressão de harmônicas em sistemas elétricos. In: **Sessão Técnica Especial de Interferências, Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia**. São Paulo, 2001. Disponível em:

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/3168>. Acesso em: 02 fevereiro 2025.

SEIDLER, Rubens Pflieger. **Projeto e Simulação de Filtros Passivos para Componentes Harmônicas de Corrente em Instalações Industriais de Baixa Tensão**. 2022. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SILVA, Marina Mariana Davi da. **Análise de Filtros Passivos de Harmônicos de Conversor CA/CC de Seis Pulsos**. 2007. 188 f. Dissertação (Pós Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007092501.pdf>. Acesso em: 13 maio 2023.

SILVA, Wander G. da *et al.* Correntes Harmônicas Causadas pelo Motor de Indução Alimentado por Inversor de Frequência no Contexto das Recomendações da Norma IEEE Standard 519-92. **XI CEEL**, Universidade Federal de Uberlândia, 2013, Uberlândia. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013_020.pdf. Acesso em: 8 abr. 2023.

SOUSA, Luiz Américo Rico de. **Proposta para Medição de Distorções Harmônicas e Inter-harmônicas Variantes no Tempo em Cargas Não Lineares**. 2019. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/2106>. Acesso em: 13 maio 2023.

TEIXEIRA, D. A. **Análise das Distorções Harmônicas – Estudo de Caso de Um Sistema Industrial**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CJHGU>. Acesso em: 10 maio 2023.

TEODORO, Diogo. **Estudo Sobre a Utilização de Filtros Passivos para Redução de Conteúdo Harmônico nas Instalações Elétricas do IFSC - Câmpus Florianópolis**. 2019. 155 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

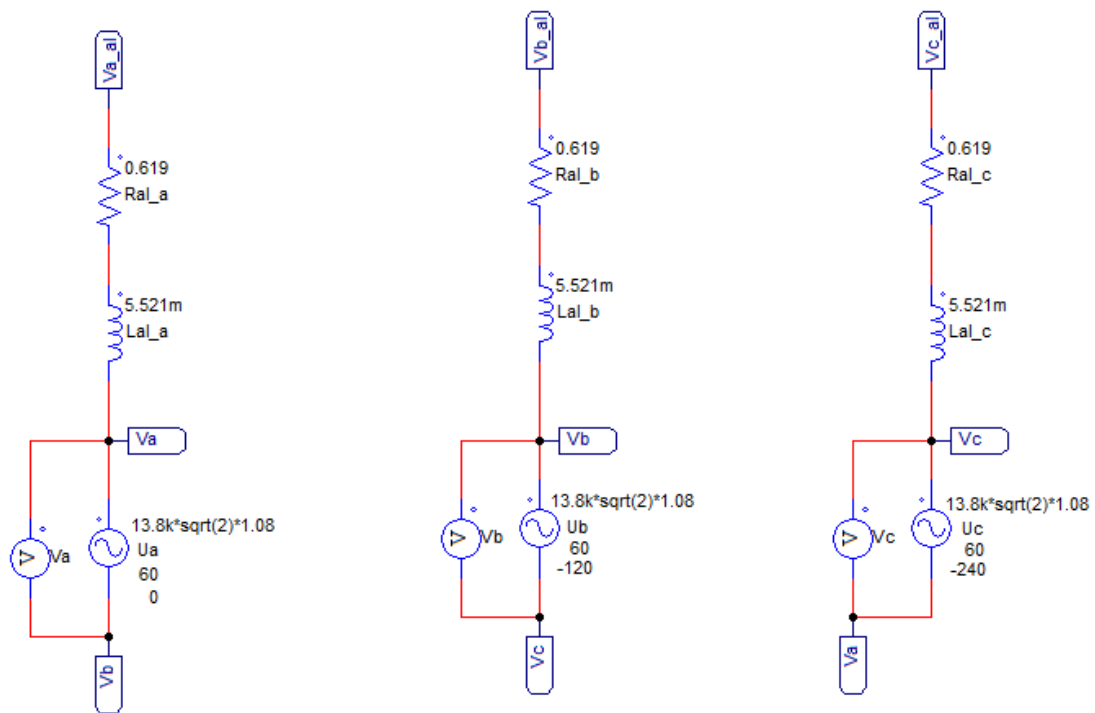
VARIZ, Abilio Manuel. **Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes**. 2006. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. I.], 2006. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006120501>. Acesso em: 10 maio 2023.

VELASCO, Loana Nunes. **Análise Experimental de Erros de Medição de Energia Elétrica Ativa em Medidores Eletromagnéticos tipo Indução, Sujeitos a Distorções Harmônicas de Correntes e Tensões, em Sistemas Equilibrados e Desequilibrados**. 2007. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, UNESP, Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/87277>. Acesso em: 10 maio 2023.

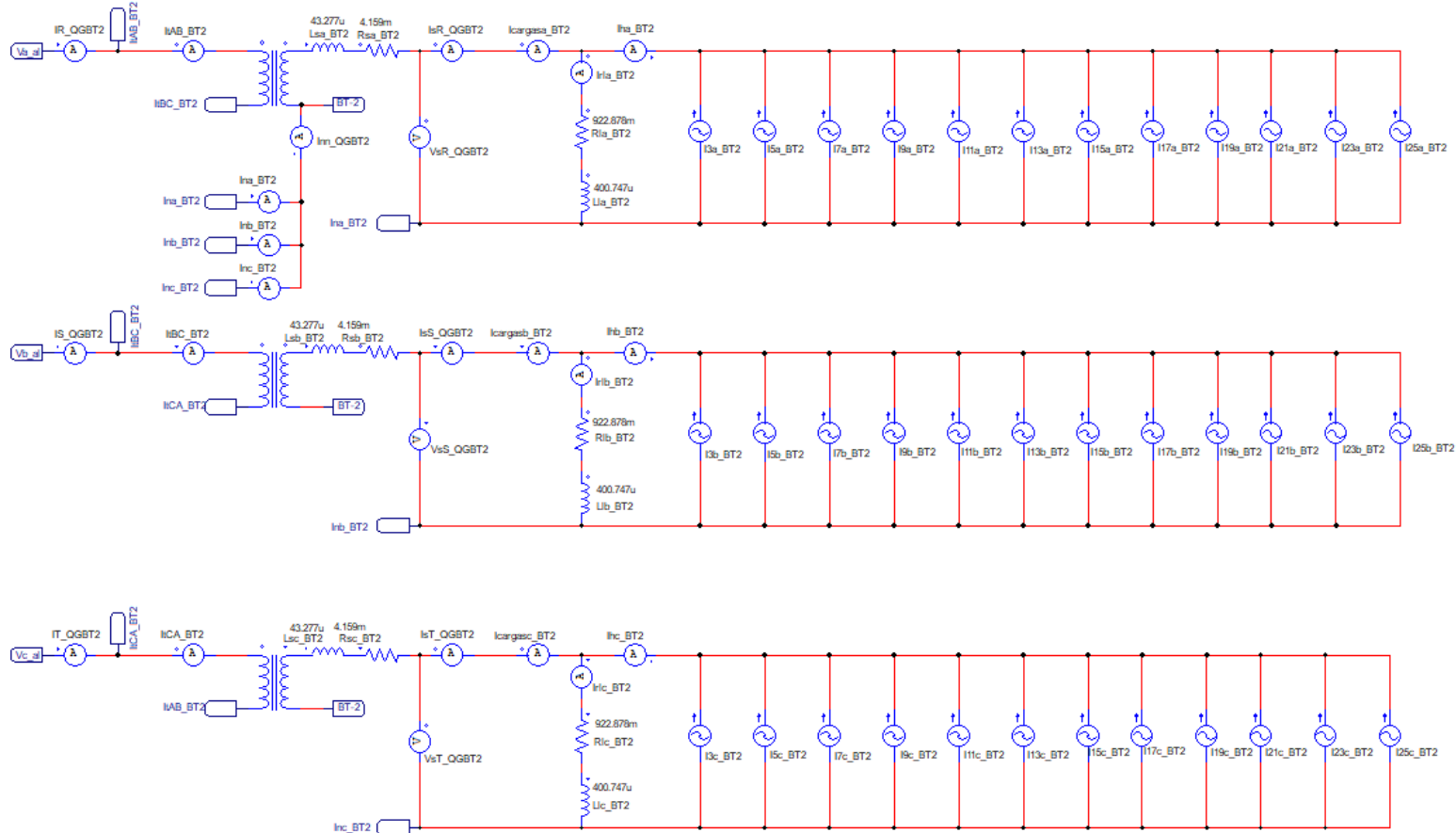
YOKOGAWA, **CW500**. Disponível em:
<http://www.yokogawa.com.br/tm/produtos/analisadores-de-qualidade-de-energia/cw500.html>. Acesso em: 09 jun. 2023.

**APÊNDICE A – MODELAGEM DA PLANTA EQUILIBRADA SEM OS FILTROS
*SHUNT***

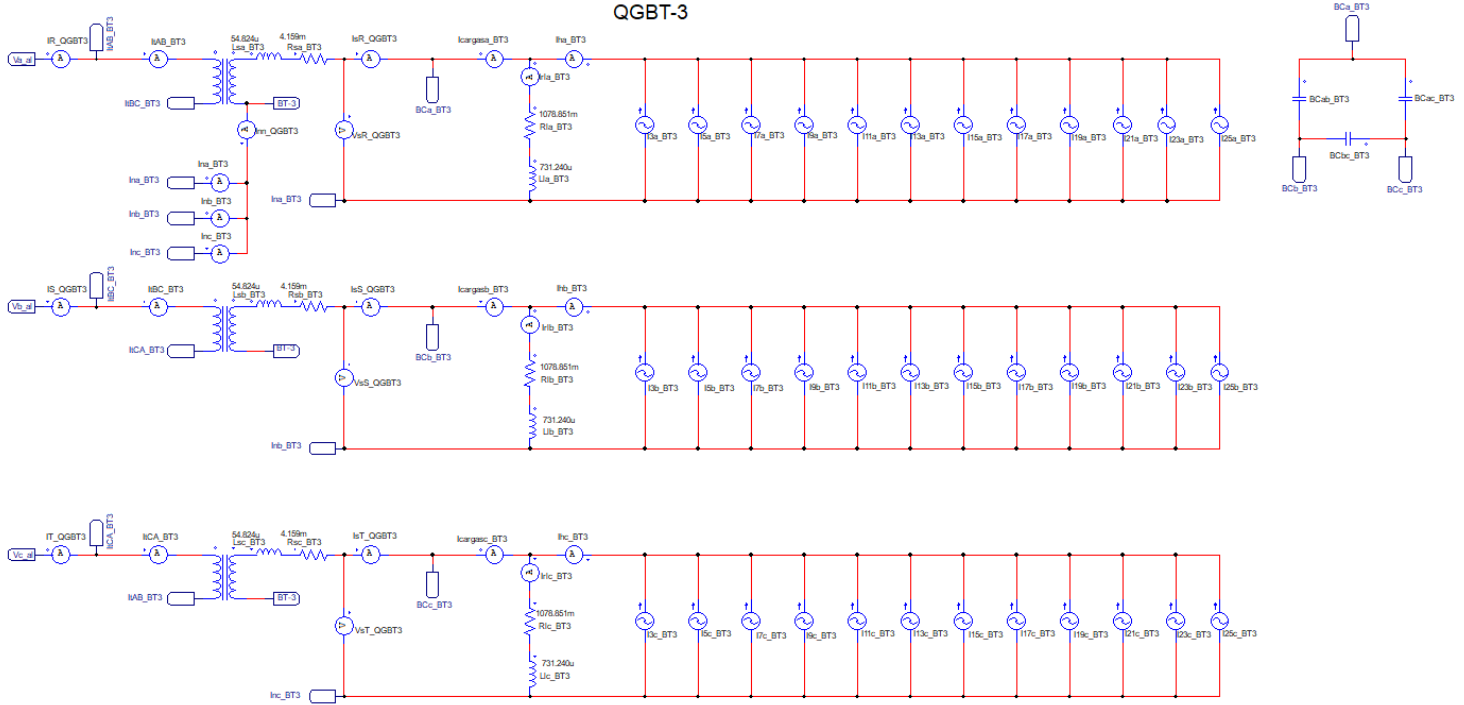
Tensão de alimentação



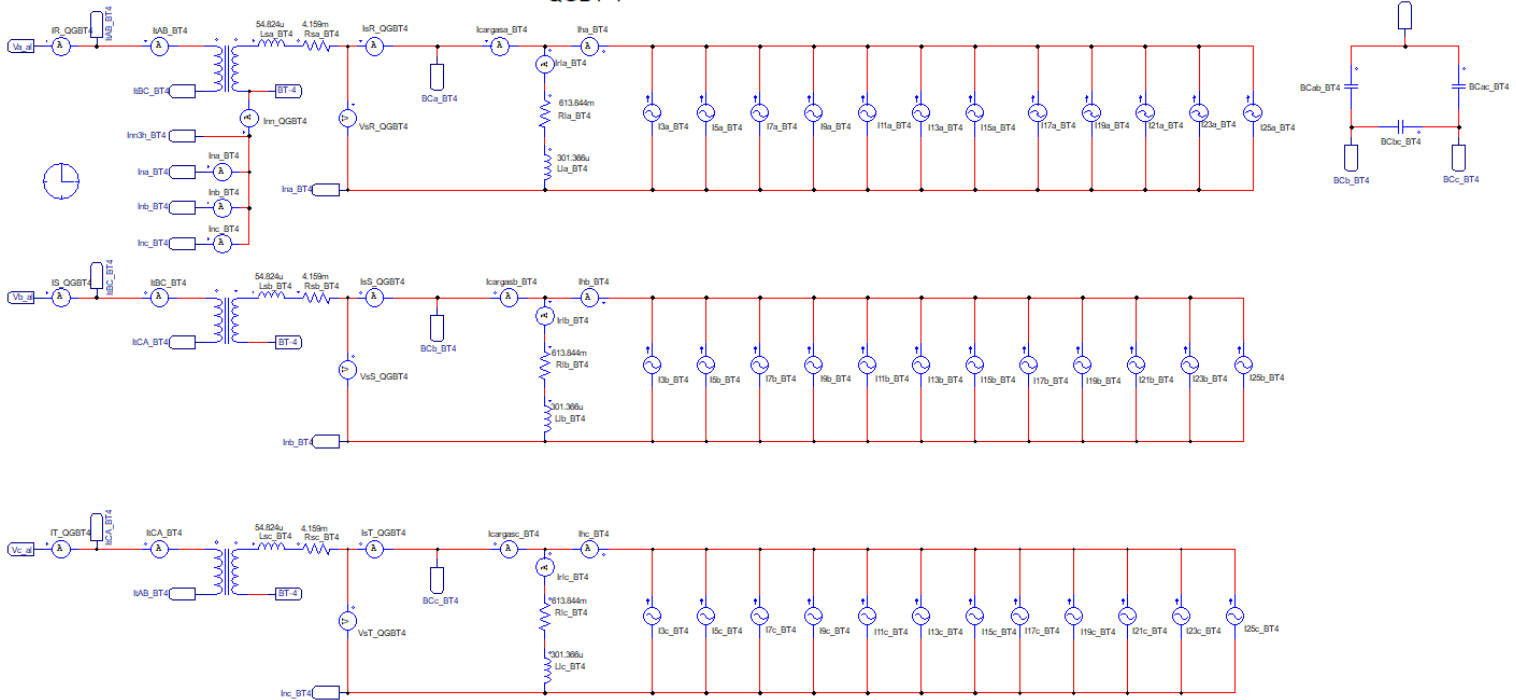
QGBT-2



QGBT-3

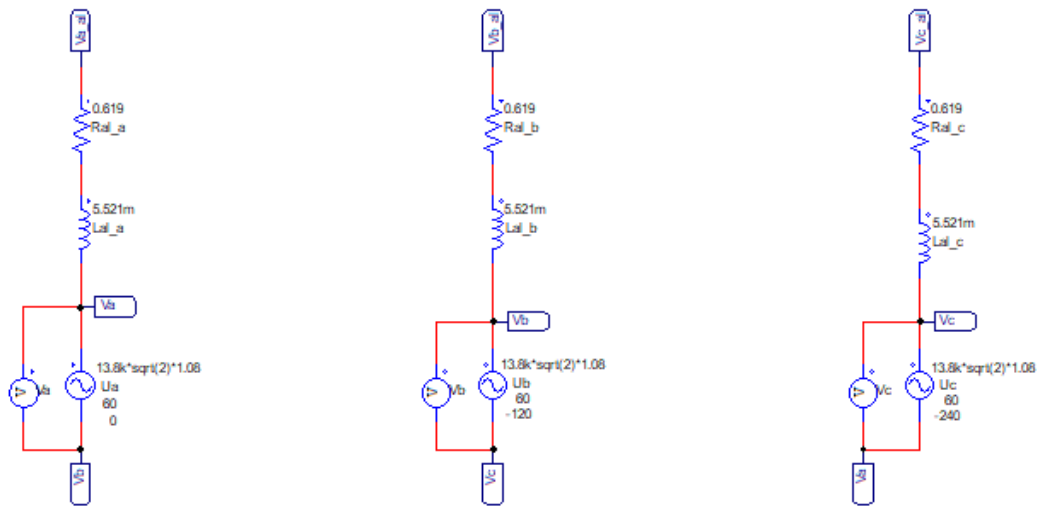


QGBT-4

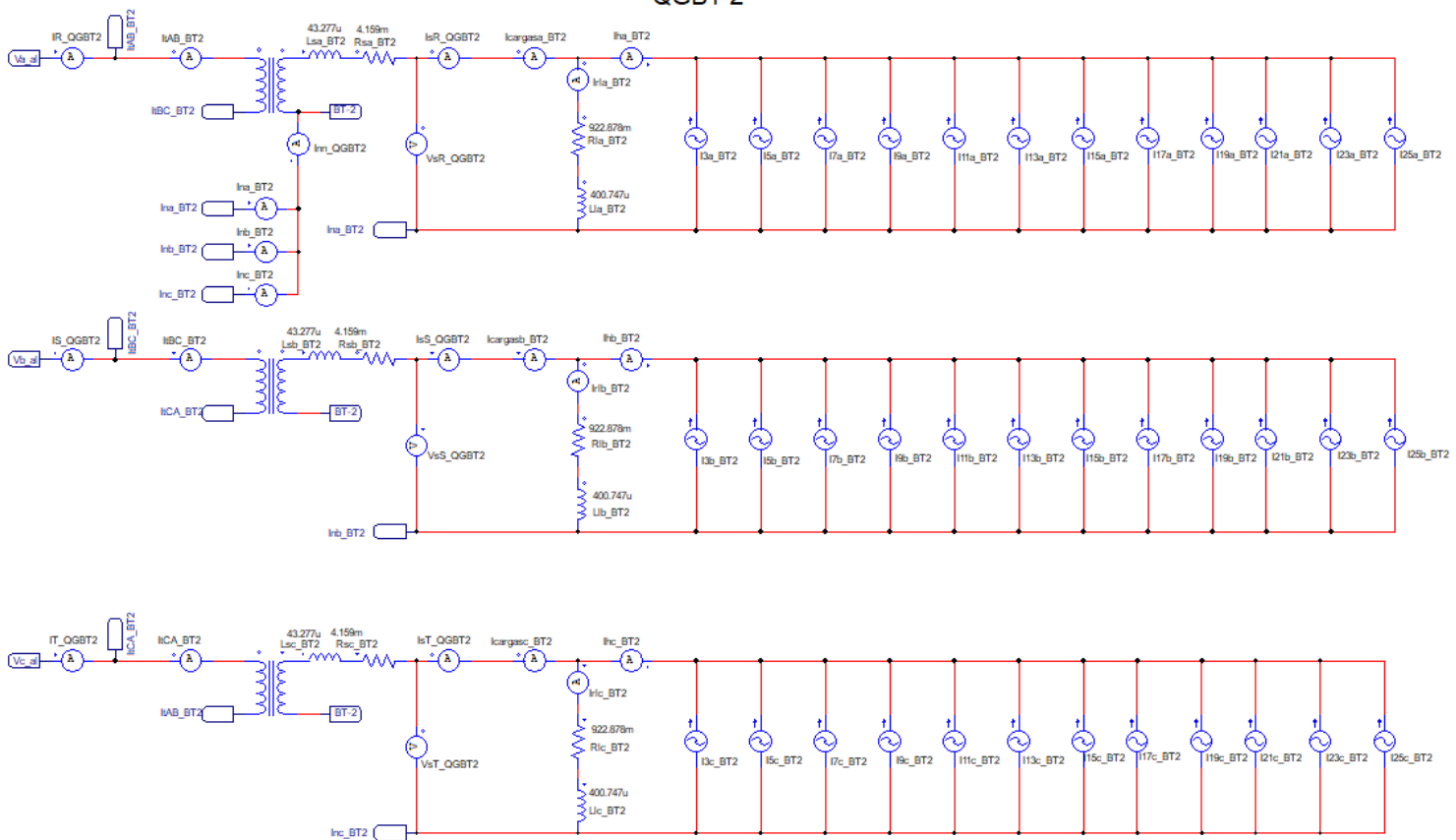


**APÊNDICE B – MODELAGEM DA PLANTA EQUILIBRADA COM OS
FILTROS *SHUNT***

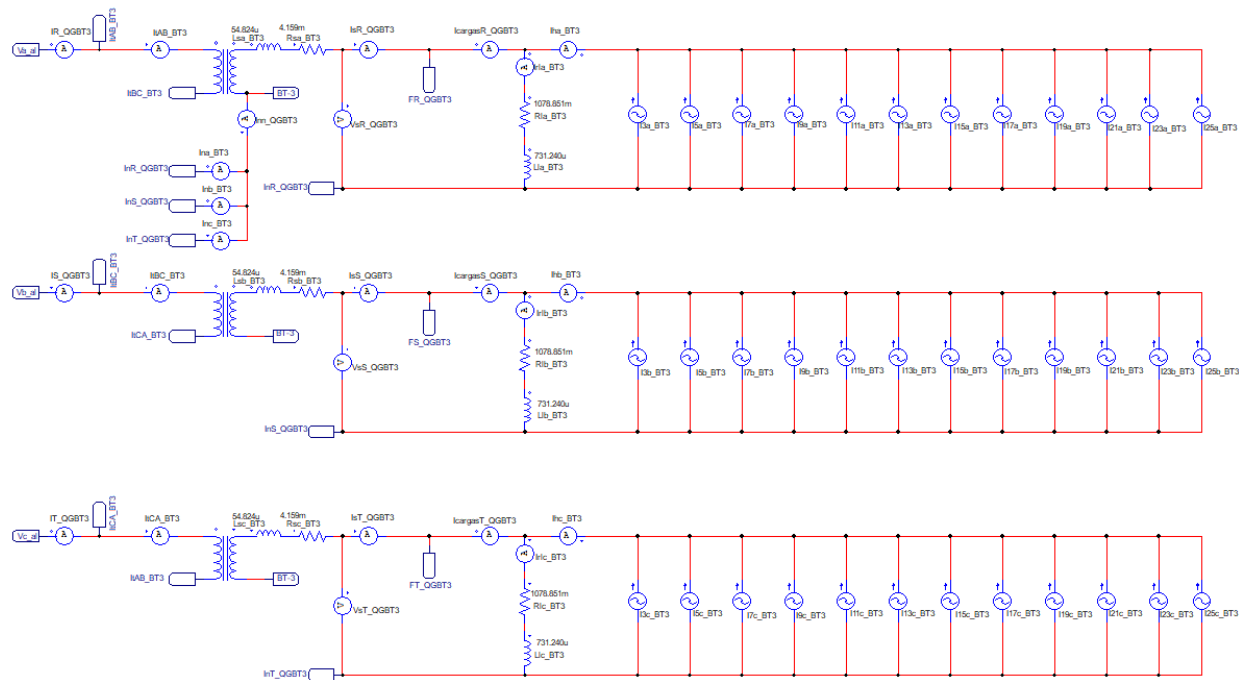
Tensão de alimentação



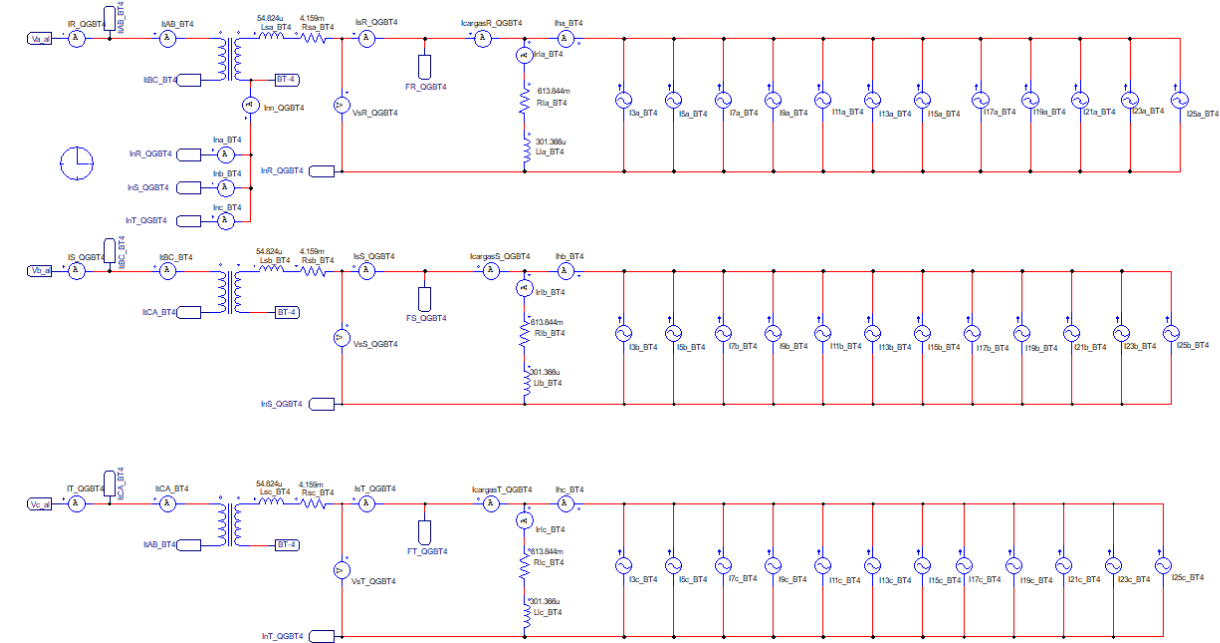
QGBT-2



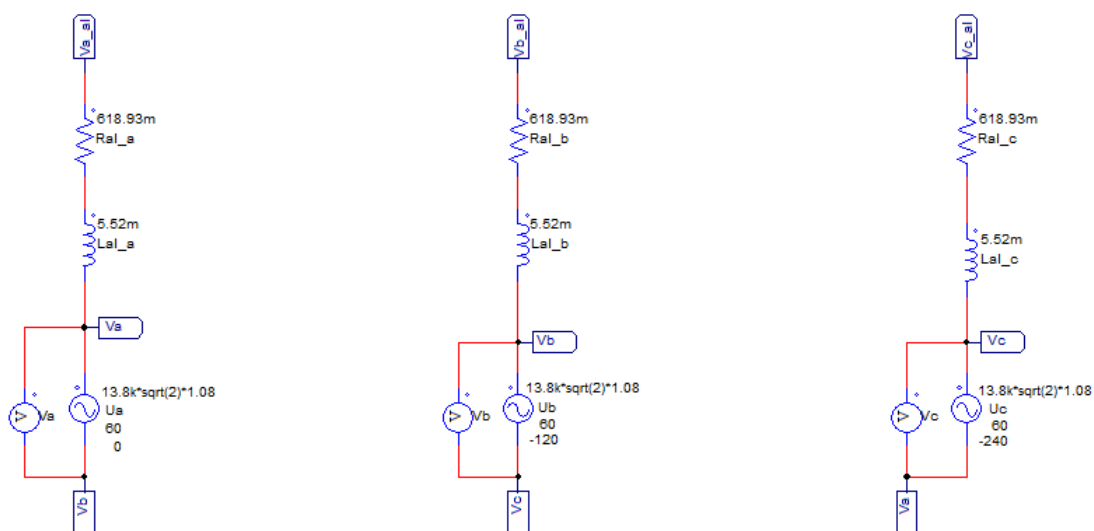
QGBT-3



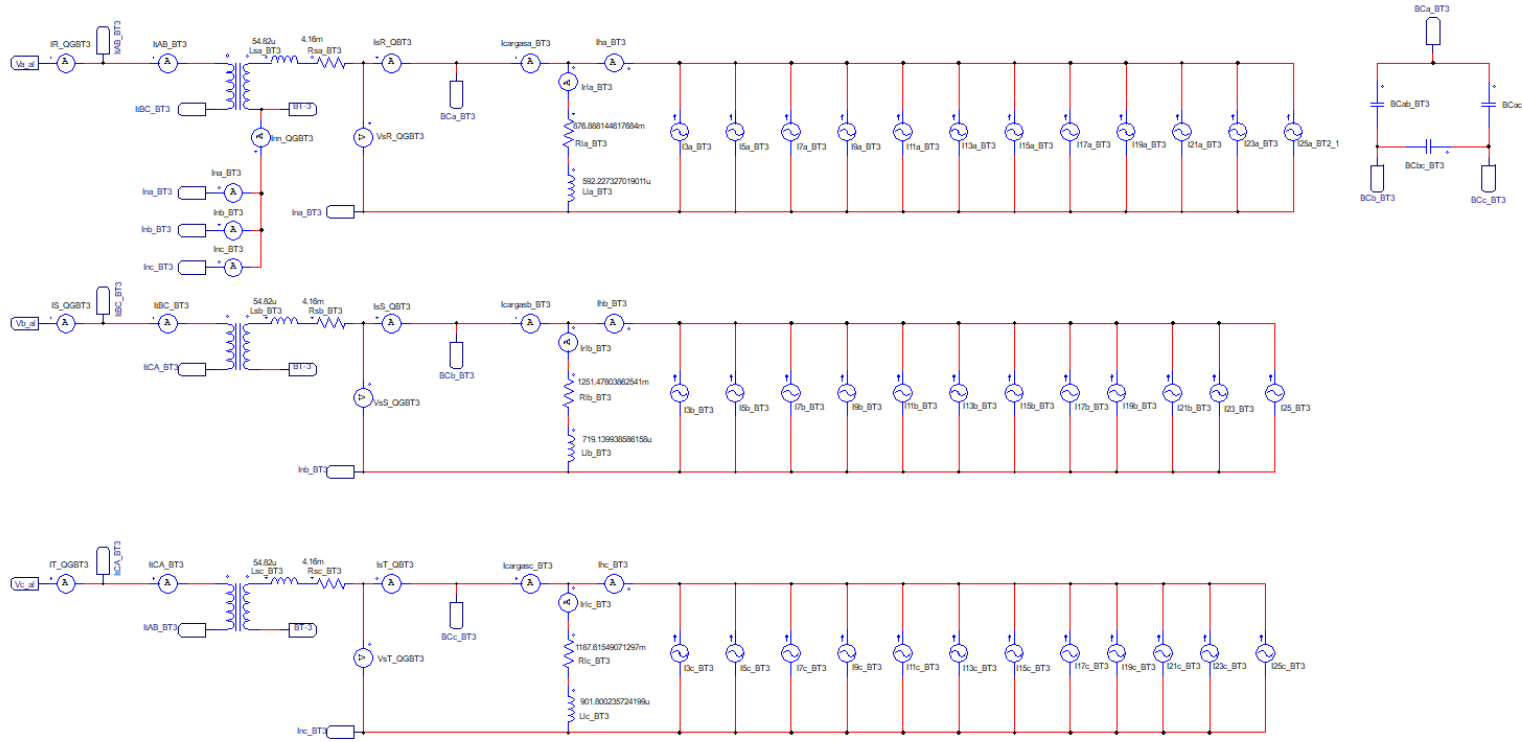
QGBT-4



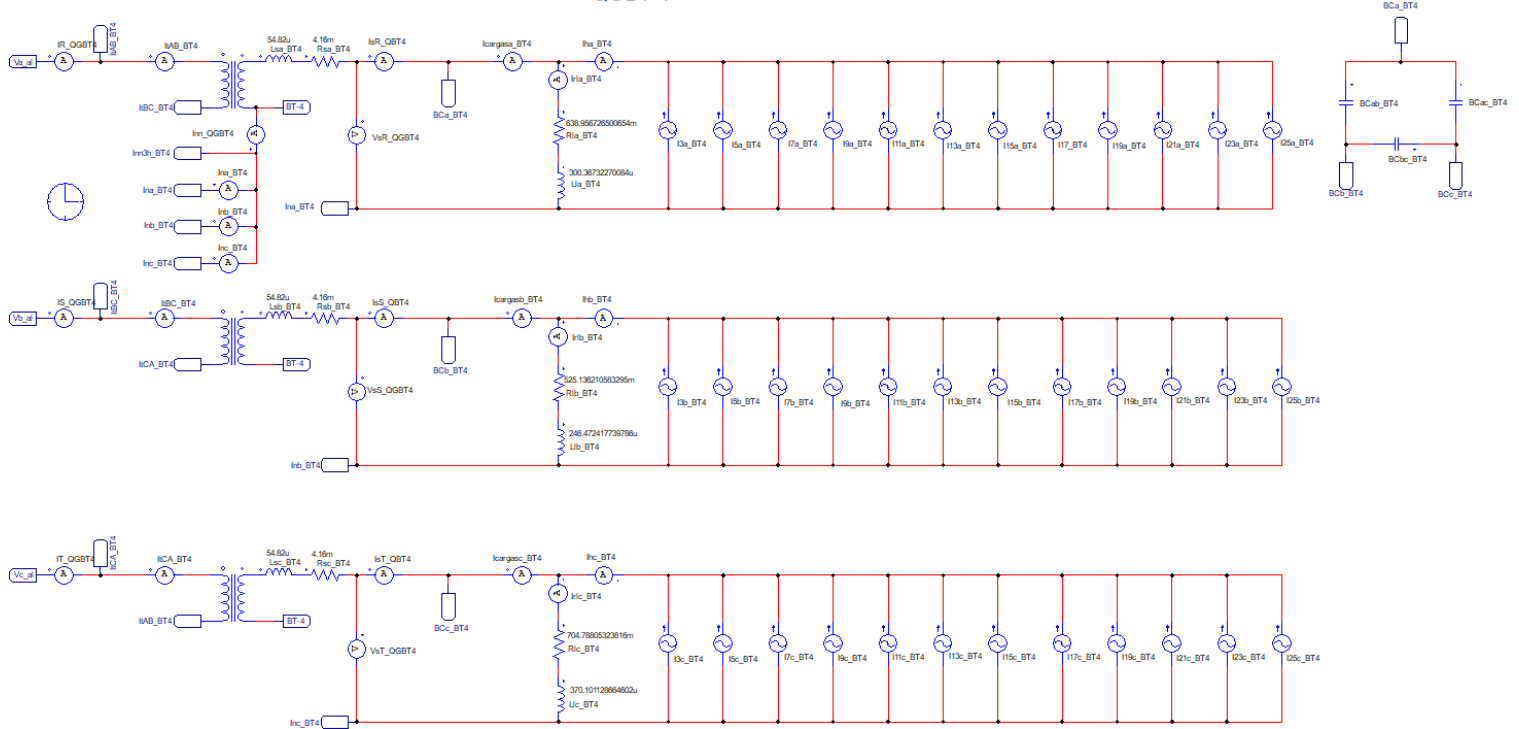
**APÊNDICE C – MODELAGEM DA PLANTA DESEQUILIBRADA SEM OS
FILTROS *SHUNT***



QGBT-3

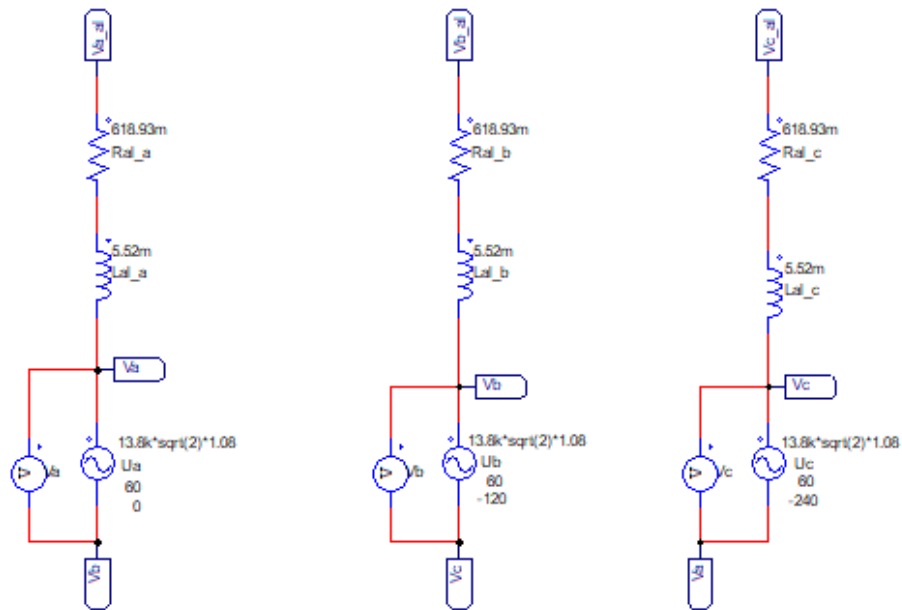


QGBT-4



**APÊNDICE D – MODELAGEM DA PLANTA DESEQUILIBRADA COM OS
FILTROS *SHUNT***

Tensão de alimentação



QGBT-2

