

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

DIOGO TEODORO

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA
REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO NAS INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS DO IFSC - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

FLORIANÓPOLIS, 2019.

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

DIOGO TEODORO

**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA
REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO NAS INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS 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 Eletricista.

Orientador:
Prof. Dr. Bruno Scortegagna Dupczak

Coorientador:
Prof. Dr. Enio Valmor Kassick

FLORIANÓPOLIS, 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Teodoro, Diogo

ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA
REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DO
IFSC - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS / Diogo Teodoro ; orientação
de Bruno Scortegagna Dupczak; coorientação
de Enio Valmor Kassick. - Florianópolis, SC, 2019.

151 p.

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

Inclui Referências.

1. Distorção Harmônica. 2. Qualidade da Energia Elétrica.
3. Filtros Passivos. I. Scortegagna Dupczak,
Bruno. II. Valmor Kassick, Enio. III. Instituto Federal
de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.
IV. Título.

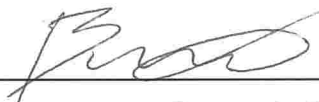
**ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS PARA
REDUÇÃO DE CONTEÚDO HARMÔNICO NAS INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS DO IFSC - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS**

DIOGO TEODORO

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, 26 de junho, 2019.

Banca Examinadora:



Prof. Bruno Scortegagna Dupczak, Dr.Eng.



Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.Eng.



Prof. Márcio S. Ortmann, Dr.Eng.



Prof(a) Lisandra K. Ries, Dr.Eng.

RESUMO

Nos últimos anos, o Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) tem apresentado um crescimento acentuado na infraestrutura, devido a criação de novos cursos na área de engenharia e pós-graduação, aumentando significativamente a demanda de energia elétrica. A instalação elétrica do Câmpus Florianópolis se caracteriza pela forte presença de cargas monofásicas lineares e não-lineares, de pequena potência individual, mas em grande quantidade, acarretando em uma potência total significativa. Em razão destas características, as componentes harmônicas de terceira ordem exercem dominância na distorção total da demanda (TDD). A presença de distorções harmônicas na rede elétrica implica na necessidade de sobredimensionamento dos condutores e dos elementos de proteção. Para adequar a instalação aos limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), esta pesquisa tem o intuito de projetar filtros passivos trifásicos com reator monofásico (topologia 3C1L) para redução das harmônicas de terceira ordem no quadro geral de baixa tensão (QGBT-4) do IFSC Câmpus Florianópolis, onde estão conectados o transformador trifásico a seco de 500 kVA (380/220 V) e os módulos fotovoltaicos de 70 kVA. Com a conexão do filtro *shunt* 3C1L, verifica-se que o caminho de baixa impedância criado no QGBT-4 não influencia os níveis harmônicos nos demais QGBTs, facilitando desta maneira a elaboração do projeto. No entanto, reduz de maneira significativa o valor eficaz total da corrente no condutor de neutro, principalmente no sistema equilibrado, que não apresenta a componente harmônica na frequência fundamental.

Palavras-chave: Distorção Harmônica; Qualidade da Energia Elétrica; Filtros Passivos.

ABSTRACT

In the last years, the Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) has presented an accentuated growth in infrastructure, due to the creation of new courses on the engineering area and the post graduation, increasing significantly the demand of electrical energy. The electrical installation of the Florianopolis campus is characterized by the strong presence of linear and nonlinear single-phase electrical charges, of small individual power, but in huge quantity, resulting in a significant total power. By reason of these characteristics, the third-order harmonic components exert dominance in the total distortion of demand (TDD). The presence of harmonic distortions in the power grid implies on the need of over-dimensioning the conductors and protective elements. To adequate the installation to the limits recommended by the IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), this research has the intent of projecting three-phase passive filters with a single-phase reactor (topology 3C1L) to reduce the third-order harmonics on the general low voltage distribution board (QGBT-4) of the IFSC Florianopolis campus, where the dry three-phase transformer of 500kVA (380/220V) and the photovoltaic module of 70kVA are connected. With the connection of the shunt filter 3C1L, it verifies that the low impedance path created in the QGBT-4 doesn't influence on the harmonic levels of the further QGBTs, thus facilitating the elaboration of the project. However, significantly reduces the total effective value of the current on the neutral conductor, mainly on the balanced system, that doesn't present the harmonic component at the fundamental frequency.

Keywords: Harmonic distortion; Electrical energy quality; Passive filters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Terminologia do módulo 8 do PRODIST	25
Figura 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	27
Figura 3 – Diagrama Unifilar da Subestação.....	30
Figura 4 - Características da instalação fornecidas pela concessionária	31
Figura 5 - Percentuais de harmônicas e da TDD das fases dos QGBTs.	32
Figura 6 – Harmônicas de ordem ímpar entre 3 e 11	32
Figura 7 - Amplitude percentual das componentes harmônicas de corrente no condutor de neutro, em relação ao valor eficaz total	33
Figura 8 - Valores eficazes da terceira harmônica de corrente no QGBT-4.....	33
Figura 9 - Comportamento da impedância do filtro shunt no espectro de frequências.....	35
Figura 10 - Filtro trifásico com reator trifásico	36
Figura 11 - Filtro <i>shunt</i> LC série trifásico com reator monofásico	37
Figura 12 – Modelagem por fontes de corrente.....	40
Figura 13 – Diagrama unifilar simplificado da subestação com a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	45
Figura 14 - Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos respectivos QGBTs.....	54
Figura 15 - THD _i para cada fase dos QGBTs obtidas através de medição e de simulação do modelo.....	55
Figura 16 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs	55
Figura 17 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-2 obtidas através de medição e simulação.....	56
Figura 18 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-3 obtidas através de medição e simulação.....	57
Figura 19 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-4 obtidas através de medição e simulação.....	57
Figura 20 – Espectro harmônico da corrente no condutor de neutro dos respectivos QGBTs.....	58
Figura 21 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-2	59
Figura 22 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-3	59

Figura 23 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-4	60
Figura 24 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs.....	61
Figura 25 – Medição da THD _i para cada fase a montante e a jusante dos transformadores responsáveis pela alimentação dos QGBTs.....	62
Figura 26 - Espectros harmônicos das correntes a montante dos transformadores	62
Figura 27 - Tensão e corrente vistas pelos alimentadores de cada QGBT com o filtro <i>shunt</i> 3C1L	67
Figura 28 - THD _i para cada fase dos QGBTs obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	68
Figura 29 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	69
Figura 30 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-2 obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	70
Figura 31 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-3 obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	71
Figura 32 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-4 obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	71
Figura 33 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	72
Figura 34 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-2 com filtro 3C1L	73
Figura 35 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-3 com filtro 3C1L	74
Figura 36 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-4 com filtro 3C1L	74
Figura 37 – Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro no sistema equilibrado	75
Figura 38 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	76
Figura 39 – Medição da THD _i a montante dos transformadores após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	77
Figura 40 - Espectros harmônicos das correntes a montante dos transformadores após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	77
Figura 41 – Medição da componente fundamental da corrente a montante dos transformadores após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	78
Figura 42 - Espectro harmônico da corrente na carga, do banco capacitivo trifásico e do reator monofásico do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	79
Figura 43 – Desempenho do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	80

Figura 44 - Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos respectivos QGBTs no sistema desequilibrado	86
Figura 45 - THD _i para cada fase dos QGBTs no sistema desequilibrado obtidas através de medição e de simulação do modelo proposto	87
Figura 46 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs para o sistema desequilibrado	88
Figura 47 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-2 para o sistema real	89
Figura 48 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-3 para o sistema real	89
Figura 49 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-4 para o sistema real	90
Figura 50 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs para o sistema real	91
Figura 51 - Amplitude das harmônicas no condutor de neutro do QGBT-2 para o sistema real	92
Figura 52 - Amplitude das harmônicas no condutor de neutro do QGBT-3 para o sistema real	92
Figura 53 - Amplitude das harmônicas no condutor de neutro do QGBT-4 para o sistema real	93
Figura 54 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs para o sistema desequilibrado	94
Figura 55 – Medição da THD _i para cada fase a montante e a jusante dos transformadores responsáveis pela alimentação dos QGBTs no sistema desequilibrado	95
Figura 56 - Espectro harmônico da corrente de linha a montante dos transformadores no sistema real	95
Figura 57 - Tensão e corrente vistas pelo alimentador para cada fase com o filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado.....	98
Figura 58 - THD _i para cada fase dos QGBTs obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado	99
Figura 59 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado	100
Figura 60 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-2 para o sistema real obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	101
Figura 61 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-3 para o sistema real obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	102
Figura 62 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-4 para o sistema real obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	102
Figura 63 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado.....	103

Figura 64 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-2 com filtro 3C1L para o sistema desequilibrado.....	104
Figura 65 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-3 com filtro 3C1L para o sistema desequilibrado.....	105
Figura 66 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-4 com filtro 3C1L para o sistema desequilibrado.....	105
Figura 67 – Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro no sistema desequilibrado	106
Figura 68 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L no sistema desequilibrado	107
Figura 69 – Medição da THD _i a montante dos transformadores no sistema desequilibrado após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	108
Figura 70 - Espectro harmônico da corrente a montante dos transformadores no sistema desequilibrado após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	108
Figura 71 – Medição da componente fundamental da corrente a montante dos transformadores no sistema desequilibrado após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	109
Figura 72 - Espectro harmônico da corrente na carga, do banco capacitivo trifásico e do reator monofásico do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado	110
Figura 73 – Desempenho do filtro <i>shunt</i> 3C1L no sistema desequilibrado	111
Figura 74 - Tensão e corrente no reator monofásico	139
Figura 75 – Painel elétrico com o filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	148
Figura 76 – Painel elétrico do banco capacitivo correspondente ao QGBT- 4	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados de 120 V a 69 kV	28
Tabela 2 – Características do alimentador	47
Tabela 3 – Características dos transformadores dos respectivos QGBTs	47
Tabela 4 – Perdas nominais dos transformadores dos respectivos QGBTs de acordo com NBR 5356	48
Tabela 5 – Características elétricas dos transformadores	49
Tabela 6 – Dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema equilibrado...	50
Tabela 7 – Valores de potências nos QGBTs referentes ao sistema equilibrado.....	51
Tabela 8 – Unidades capacitivas para cada QGBT referente ao sistema equilibrado	52
Tabela 9 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs	52
Tabela 10 – Amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares para o sistema equilibrado.....	53
Tabela 11 – Medições dos valores das grandezas referentes a simulação do modelo proposto.....	54
Tabela 12 – Amplitudes das correntes harmônicas obtidas por meio de simulação	56
Tabela 13 – Amplitudes das correntes harmônicas no condutor de neutro dos QGBTs.....	58
Tabela 14 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, referente a simulação do modelo proposto.....	60
Tabela 15 –THD _i vistas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs	61
Tabela 16 – Amplitudes das correntes harmônicas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs, obtidas por meio de simulação	63
Tabela 17 – Valores das grandezas necessárias para determinar o parâmetro I_{sc}/I_L	64
Tabela 18 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD	64
Tabela 19 – Dados tratados das medições no QGBT-4	65
Tabela 20 – Unidades capacitivas para cada fase do QGBT-4 referente ao sistema equilibrado.....	66
Tabela 21 – Valores das grandezas referentes aos alimentadores após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	68

Tabela 22 – Amplitudes das correntes harmônicas obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	70
Tabela 23 – Amplitudes das correntes harmônicas no neutro dos QGBTs.....	73
Tabela 24 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	75
Tabela 25 – THD _i vistas a montante dos transformadores dos QGBTs obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L	76
Tabela 26 –Parâmetro I _{sc} /I _L após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	81
Tabela 27 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	81
Tabela 28 – Dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado	83
Tabela 29 – Valores de potências nos QGBTs referentes ao sistema desequilibrado	84
Tabela 30 – Unidades capacitivas para cada QGBT referente ao sistema desequilibrado	84
Tabela 31 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs para o sistema desequilibrado	85
Tabela 32 – Amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares para o sistema desequilibrado.....	85
Tabela 33 – Valores das grandezas referentes a simulação do modelo proposto para o sistema real	87
Tabela 34 – Amplitudes das correntes harmônicas obtidas por meio de simulação para o sistema real	88
Tabela 35 – Amplitudes das correntes harmônicas no condutor de neutro dos QGBTs para o sistema desequilibrado	91
Tabela 36 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, referente a simulação do modelo proposto para o sistema desequilibrado	93
Tabela 37 –THD _i vistas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs no sistema real	94
Tabela 38 – Amplitudes das correntes harmônicas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs para o sistema desequilibrado	96
Tabela 39 – Valores das grandezas necessárias para determinar o parâmetro I _{sc} /I _L	97
Tabela 40 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD	97
Tabela 41 – Valores das grandezas referentes aos alimentadores após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado.....	99

Tabela 42 – Amplitudes das correntes harmônicas no sistema desequilibrado obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	101
Tabela 43 – Amplitudes das correntes harmônicas no condutor de neutro dos QGBTs no sistema desequilibrado obtidas por simulação	104
Tabela 44 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado.....	106
Tabela 45 – THD _i vistas a montante dos transformadores dos QGBTs no sistema desequilibrado obtidas após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L.....	107
Tabela 46 –Parâmetro I_{sc}/I_L após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L para o sistema desequilibrado	112
Tabela 47 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD após a inserção do filtro <i>shunt</i> 3C1L no sistema desequilibrado	112
Tabela 48 – Medições dos valores das grandezas referentes ao indutor monofásico	139
Tabela 49 – Dados do projeto físico do reator monofásico	140
Tabela 50 – Dados do Núcleo 125UI	141
Tabela 51 – Dados do condutor AWG 00.....	143
Tabela 52 – Características das unidades capacitivas do filtro <i>shunt</i> para cada fase do QGBT-4	147
Tabela 53 – Massa e volume do banco capacitivo para cada fase do QGBT-4.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_c - Seção Magnética

A_p - Produto das áreas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

A_t - Área de superfície

A_{wL} - Seção do condutor nu

$A_{wL,AWG00}$ - Seção do condutor AWG 00

B_{ac} - Densidade de fluxo

$B_{ac,novo}$ - Densidade de fluxo corrigido

C_{sh} - Capacitância do filtro *shunt*

DAE – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

$DIT_h\%$ - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

$DTT\%$ - Distorção harmônica total de tensão

$DTT_p\%$ - Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

$DTT_1\%$ - Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

$DTT_3\%$ - Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

E - Espessura da lâmina do núcleo

F - *Fring flux*

F_{Desl} - Fator de deslocamento

F_{Dist} - Fator de distorção

F_{Dist_i} - Fator de distorção de corrente

F_{Dist_v} - Fator de distorção de tensão

FP - Fator de potência

FIC - Cursos de qualificação profissional

f_0 - Frequência de ressonância série

f_r - Frequência da rede de alimentação

FE - Fator de execução

G - Comprimento da Janela

h - Ordem harmônica

$h_{\text{máx}}$ - Ordem harmônica máxima

h_{min} - Ordem harmônica mínima

$I_{a_h}(t)$ - Componente harmônica de ordem h da corrente na fase a

$I_{b_h}(t)$ - Componente harmônica de ordem h da corrente na fase b

$I_{c_h}(t)$ - Componente harmônica de ordem h da corrente na fase c

I_h - Corrente eficaz da harmônica de ordem h

$I_{BT,n}$ - Corrente nominal no enrolamento de baixa tensão do transformador

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

$I_{nn,ef}$ - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro

I_{nn3h} - Valor eficaz total da corrente no indutor monofásico

I_{SC} - Corrente de curto-circuito

$I_{1,ef}$ - Valor da corrente eficaz da componente fundamental obtido nas medições

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

J - Densidade de corrente

K_f - Fator de forma de onda

k_i - Coeficiente de perda no entreferro para núcleos laminados (0,155)

K_u - Fator de utilização da janela

L - Valor da indutância da carga linear

L_{al} - Valor da indutância do alimentador

l_g - Valor do entreferro

L_{sh1} - Indutância do filtro *shunt* com reator monofásico

L_{sh3} - Indutância de cada fase do filtro *shunt* com reator trifásico

L_{trafo} - Valor da indutância do transformador

M_{AWG00} - Relação g/m do condutor AWG 00

M_{cu} - Massa de cobre

MLT - Comprimento médio da espira

MPL - Comprimento do caminho magnético

N_L - Número de espiras

$N_{L,novo}$ - Número de espiras corrigido

p - número de pulsos do retificador

P_{cobre} - Perdas nos enrolamentos do transformador

$P_{cu,filtro}$ - Perdas no cobre

$P_{fe,filtro}$ - Perdas no núcleo

$P_{g,filtro}$ - Perdas no entreferro

P_{Σ} - Perdas totais no indutor monofásico

PCC - Ponto de Conexão Comum

PRODIST - Procedimentos de Distribuição

$Q_{cap}^{(U_{n,rede})}$ - Potência reativa da unidade capacitiva corrigida para tensão da rede

$Q_{cap}^{(U_{n,cap})}$ - Potência reativa comercial da unidade capacitiva

QEE - Qualidade de energia elétrica

QGBT - Quadro geral de baixa tensão

Q_{sh1} - Fator de qualidade do indutor do filtro com reator monofásico

Q_{sh3} - Fator de qualidade do indutor do filtro com reator trifásico

R - Valor da resistência da carga linear

R_{al} - Valor da resistência do alimentador

R_{AWG00} - Relação entre Ω/m do condutor AWG 00

R_{base} - Valor da resistência base no ponto de conexão da concessionária

R_{sh1} - Resistência do filtro *shunt* com reator monofásico (não-idealidade do indutor L_{sh1})

$R_{sh1,cal}$ - Resistência calculada do indutor monofásico do filtro *shunt* 3C1L

R_{sh3} - Resistência de cada fase do filtro *shunt* com reator trifásico

R_{trafo} - Valor da resistência do transformador

R_{1pu} - Valor da resistência acumulada no ponto de conexão da concessionária em pu

S_{trafo} - Potência trifásica nominal do transformador

T_r - Aumento de temperatura

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

TDD - Distorção Total da Demanda

THD - *Total Harmonic Distortion* (Distorção Harmônica Total)

THD_i - Distorção Harmônica Total da Corrente

THD_v - Distorção Harmônica Total da Tensão

$U_{n,cap}$ - Valor da tensão nominal da unidade capacitiva

$U_{n,rede}$ - Valor da tensão da rede

V_F - Tensão de fase

V_L - Tensão de linha

$V_{BT,L}$ - Tensão de linha no enrolamento de baixa tensão

V_{Lsh1} - Valor eficaz total da tensão no reator monofásico

$V_{1,ef}$ - Valor da tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental obtido nas medições

W_a - Área da Janela

X_{al} - Valor da reatância do alimentador

X_{base} - Valor da reatância base no ponto de conexão da concessionária

X_L - Valor da reatância indutiva da carga linear

X_{trafo} - Valor da reatância do transformador

X_{1pu} - Valor da reatância acumulada no ponto de conexão da concessionária em pu

Z_B - Impedância de base

Z_{pu} - Impedância percentual do transformador

Z_{trafo} - Valor da impedância do transformador

Z_1 - Módulo da impedância equivalente

μ_m - Permeabilidade magnética

ψ - Densidade de potência na superfície do núcleo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.2	JUSTIFICATIVA	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	GERAÇÃO DE HARMÔNICAS	22
2.1.1	Peculiaridade da 3° harmônica	23
2.2	NORMAS E RECOMENDAÇÕES.....	24
2.2.1	PRODIST, Módulo 8	25
2.2.2	IEEE Std 519-2014	27
2.3	CARACTERIZAÇÃO DE CONSUMIDORES DA CLASSE COMERCIAL ..	29
2.3.1	Análise do IFSC – Câmpus Florianópolis	29
2.3.1.1	Caracterização da Instalação Elétrica.....	30
2.3.1.2	Distorção harmônica da corrente	31
2.4	FILTRO PASSIVO.....	34
2.4.1	Filtro <i>shunt</i> LC série	34
2.4.2	Filtro <i>shunt</i> LC série trifásico com reator monofásico	36
3	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	38
3.1	MODELAGEM DE SISTEMAS ELÉTRICOS COMERCIAIS.....	38
3.1.1	Modelagem da planta elétrica da instalação	38
3.1.2	Modelagem do filtro <i>shunt</i> 3C1L	41
4	ESTUDO DE CASO	45
4.1	MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA	46
4.1.1	Sistema trifásico equilibrado	49
4.1.1.1	Validação do modelo proposto.....	53
4.1.1.1.1	<i>Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs</i>	55
4.1.1.1.2	<i>Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs</i>	58
4.1.1.1.3	<i>Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores</i> ..	61
4.1.1.1.4	<i>Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014</i>	63
4.1.1.2	Projeto do filtro shunt 3C1L.....	65
4.1.1.2.1	<i>Análise da THD_i nos QGBTs</i>	67
4.1.1.2.2	<i>Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs</i>	69
4.1.1.2.3	<i>Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs</i>	72
4.1.1.2.4	<i>Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores</i> ..	75
4.1.1.2.5	<i>Desempenho do filtro shunt 3C1L</i>	78
4.1.1.2.6	<i>Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014</i>	80

4.1.2	Sistema trifásico real	82
4.1.2.1	Validação do modelo proposto.....	86
4.1.2.1.1	<i>Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs.....</i>	<i>88</i>
4.1.2.1.2	<i>Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs</i>	<i>90</i>
4.1.2.1.3	<i>Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores ..</i>	<i>94</i>
4.1.2.1.4	<i>Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014.....</i>	<i>96</i>
4.1.2.2	Projeto do filtro shunt 3C1L.....	98
4.1.2.2.1	<i>Análise da THD_i nos QGBTs.....</i>	<i>98</i>
4.1.2.2.2	<i>Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs.....</i>	<i>100</i>
4.1.2.2.3	<i>Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs</i>	<i>103</i>
4.1.2.2.4	<i>Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores</i>	<i>106</i>
4.1.2.2.5	<i>Desempenho do filtro shunt 3C1L.....</i>	<i>109</i>
4.1.2.2.6	<i>Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014....</i>	<i>111</i>
5	CONCLUSÃO	114
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICE A – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA COMERCIAL.....	118
	APÊNDICE B – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA COMERCIAL COM O FILTRO SHUNT 3C1L	123
	APÊNDICE C – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA PARA O SISTEMA DESEQUILIBRADO.....	128
	APÊNDICE D – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA COMERCIAL COM O FILTRO SHUNT 3C1L PARA O SISTEMA DESEQUILIBRADO	133
	APÊNDICE E – PROJETO FÍSICO DO FILTRO SHUNT 3C1L	138
E.1	PROJETO FÍSICO DO FILTRO SHUNT 3C1L.....	139
E.1.1	REATOR MONOFÁSICO.....	139
B.1.2	BANCO CAPACITIVO.....	146
B.1.3	DIMENSIONAMENTO DO PAINEL ELÉTRICO.....	147
	ANEXO A – PLACA DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO DE 500 KVA DA CONTRAFO S.A.....	150
	ANEXO B – PLACA DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO DE 500 KVA DA ONIX	152

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo visa contextualizar o trabalho e apresentar os objetivos que nortearão a fundamentação teórica e a análise dos dados.

1.1 Definição do Problema

O Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) possui 22 campi, que oferecem cursos de qualificação profissional (FIC), cursos técnicos, de graduação e de pós-graduação. O Câmpus Florianópolis é o mais antigo, criado em 1909, onde são atendidos em torno de seis mil alunos em 49 cursos.

Nos últimos anos a instituição tem apresentado um crescimento acentuado na infraestrutura, devido a criação de novos cursos na área de engenharia e pós-graduação, que estão diretamente relacionados à ampliação dos laboratórios, máquinas didáticas e infraestrutura, aumentando significativamente a demanda de energia elétrica.

A instalação elétrica do Câmpus Florianópolis se caracteriza pela forte presença de cargas monofásicas lineares e não-lineares, de pequena potência individual, mas em grande quantidade, acarretando em uma potência total significativa. Devido a estas características, a planta do IFSC pode ser enquadrada na categoria de instalação do tipo comercial.

As cargas monofásicas não-lineares, utilizadas na instalação, possuem retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo na entrada da alimentação. Esse tipo de circuito, devido a comutação periódica dos diodos da ponte retificadora, ocasiona a interrupção do fluxo de corrente e o surgimento de componentes harmônicas, principalmente de terceira ordem.

A presença de distorções harmônicas implica na necessidade de sobredimensionamento das instalações elétricas, dispositivos de manobra, proteção e transformadores, caracterizando a subutilização da capacidade instalada, visto que a distorção da corrente indica presença de potência reativa de distorção e, conseqüentemente, a redução do fator de potência na instalação. Ademais, as

harmônicas ímpares múltiplas de três somam-se algebricamente no condutor de neutro, efeito este que, se não considerado, pode acarretar na sobrecarga deste condutor.

O tema deste estudo é verificar a viabilidade da utilização de filtros passivos para redução da componente harmônica de terceira ordem no quadro geral de baixa tensão (QGBT-4) do Câmpus Florianópolis, onde estão conectados um transformador trifásico a seco de 500 kVA (13,8kV - 380/220 V) e o sistema de microgeração de energia elétrica fotovoltaica com potência instalada de 70 kVA.

1.2 Justificativa

A relevância do trabalho está associada à necessidade de uma unidade de filtragem passiva no QGBT-4, para a compensação da energia reativa de distorção. Dessa forma será possível reduzir a sobrecarga na instalação e conseqüentemente liberar o sistema para conexão de novas cargas sem a necessidade de ampliação da subestação do Câmpus.

No Brasil, os limites de distorção harmônica de tensão na rede de distribuição estão regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio dos “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica” (ANEEL, 2018).

O (ANEEL, 2018) estabelece somente os limites da distorção harmônica da tensão, a qual pode ser uma das conseqüências da distorção harmônica da corrente. Apesar da distorção harmônica da corrente na instalação não ser um índice avaliado pela normativa brasileira, pode-se recorrer às recomendações internacionais sobre o assunto, como por exemplo a IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014).

Segundo Dupczak et al. (2018), o QGBT-4 não atende os limites propostos pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), uma vez que, em duas fases, o limite de 8% da distorção total da demanda da corrente (TDD) é excedido, bem como o limite de 7% para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre a 3ª e 11ª ordem. Além disso, a componente harmônica de 3ª ordem tem predominância nos resultados de distorção harmônica de corrente do QGBT-4.

Referente à oportunidade, esta pesquisa se justifica pelo fato da crescente demanda por energia elétrica no Câmpus Florianópolis e pela carência de estudos relacionados à filtragem passiva das componentes harmônicas presentes na instalação. Como o nível de terceira harmônica e da distorção total de corrente ultrapassam os valores recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), a redução da distorção harmônica poderá diminuir a sobrecarga da instalação, além de melhorar a qualidade da energia elétrica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Face à situação existente, pretende-se dimensionar e especificar um filtro passivo trifásico para as componentes harmônicas de terceira ordem, com intuito de minimizar as perdas na instalação, reduzir a sobrecarga na subestação e melhorar a QEE.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) projetar um filtro passivo para a componente harmônica de corrente de terceira ordem, visando atender aos limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014);
- b) analisar o desempenho do filtro para carga equilibrada e desequilibrada;
- c) verificar o desempenho do Filtro *Shunt* LC Série Trifásico com Reator Monofásico;
- d) reduzir a sobrecarga no condutor de neutro a montante do QGBT-4;
- e) analisar o fluxo das harmônicas entre os transformadores da subestação do Câmpus, após a implantação do filtro no QGBT-4.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em 5 (cinco) capítulos. O primeiro capítulo trata da justificativa do problema, introdução e os objetivos.

O segundo capítulo é a fundamentação teórica, onde descreve as cargas responsáveis pela geração de harmônicos, a peculiaridade das harmônicas homopolares, a normativa nacional sobre o assunto, as recomendações da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), a caracterização de consumidores de classe comercial e a medição da distorção harmônica da corrente no IFSC – Câmpus Florianópolis.

O terceiro capítulo refere-se a metodologia adotada para modelar a planta elétrica e analisar o filtro *shunt* LC série trifásico com reator monofásico (3C1L) deste estudo.

No capítulo 4 encontram-se os dados e simulações da modelagem da planta elétrica comercial e do projeto do filtro *shunt* 3C1L para o sistema equilibrado e desequilibrado, juntamente com seus respectivos desempenhos.

Por último, o quinto capítulo apresenta as considerações finais e as sugestões para os trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geração de Harmônicas

O surgimento de correntes e tensões harmônicas está relacionada com a natureza não-linear de cargas chaveadas (cargas eletrônicas) e convencionais (transformadores de potência e máquinas elétricas). As cargas lineares não geram harmônicos (SCHWARZ, 2006).

De acordo com Teixeira (2009), as distorções harmônicas nas cargas não-lineares convencionais estão associadas à utilização de transformadores e máquinas elétricas, sendo as principais causas de distorções harmônicas as correntes de magnetização dos transformadores e os desvios da forma de onda senoidal ideal dos geradores elétricos.

Conforme Kassick (2016), o funcionamento do transformador de potência acarreta na presença de harmônicos devido corrente de magnetização não-senoidal provocada pela região não-linear da curva de magnetização, visto que a corrente apresenta simetria em relação ao eixo das abcissas, a mesma resultará somente em harmônicas ímpares, sendo a 3^o harmônica a maior responsável pela não-linearidade.

Em função do avanço da eletrônica de potência, o uso de equipamentos eletrônicos (cargas não-lineares chaveadas), está cada vez mais difundido em relação às últimas décadas. Estes equipamentos eletrônicos drenam da rede correntes senoidais com frequências múltiplas da fundamental, denominadas frequências harmônicas, acarretando em distorção na forma de onda da corrente e consequentemente da tensão.

Segundo Pereira (1999), os conversores estáticos são utilizados na maioria dos eletrodomésticos e equipamentos de informática, devido aos benefícios de volume e peso, sendo as principais fontes de harmônicas nos sistemas de baixa tensão. A ordem das componentes harmônicas características (h) geradas em virtude dos retificadores é determinada de acordo com a Equação 1:

$$h = kp \pm 1 \tag{1}$$

Onde:

$$k = 1,2,3,4,\dots$$

p = número de pulsos no lado CC do retificador

As harmônicas mais próximas da frequência fundamental predominam na composição do valor da Distorção Harmônica Total (THD).

As harmônicas de ordem mais elevada, e conseqüentemente, de frequência mais elevada, apresentam amplitudes reduzidas fundamentalmente porque são suavizadas pelas próprias indutâncias presentes nas redes elétricas. Isto ocorre devido ao fato de que quanto maior a frequência do harmônico, maior será a reatância indutiva da linha para tal frequência, acarretando uma maior dificuldade de passagem do harmônico, deste modo as principais harmônicas de um sistema correspondem aos valores mais próximos à fundamental. (NERY; HOPNER, 2016, p.25).

De acordo com Kassick (2016), a THD representa a relação entre o valor eficaz do conjunto das harmônicas e valor eficaz da componente fundamental, portanto a redução das harmônicas mais próximas da frequência fundamental tem impacto mais significativo na correção da THD.

2.1.1 Peculiaridade da 3° harmônica

Segundo Kassick (2016), no sistema trifásico equilibrado, as correntes das cargas lineares apresentam defasagem de 120° entre as fases, acarretando na corrente do neutro igual a zero. Porém, em uma instalação com cargas não-lineares, mesmo que sejam cargas trifásicas equilibradas, haverá presença de harmônicas de 3ª ordem e as múltiplas ímpares de três no neutro, pois as respectivas correntes estarão em fase entre si, de acordo com as equações 2, 3 e 4:

$$I_{a_h}(t) = \sqrt{2} \times I_h \times \cos(h \times (wt + 0^\circ)) \quad (2)$$

$$I_{b_h}(t) = \sqrt{2} \times I_h \times \cos(h \times (wt - 120^\circ)) \quad (3)$$

$$I_{c_h}(t) = \sqrt{2} \times I_h \times \cos(h \times (wt - 240^\circ)) \quad (4)$$

Onde:

$I_{a_h}(t)$ = Componente harmônica de ordem h da corrente na fase a

$I_{b_h}(t)$ = Componente harmônica de ordem h da corrente na fase b

$I_{c_h}(t)$ = Componente harmônica de ordem h da corrente na fase c

I_h = Corrente eficaz da harmônica de ordem h

h = Ordem harmônica

Como as componentes harmônicas de corrente de terceira ordem e suas múltiplas ímpares somam-se algebricamente no condutor de neutro, ocorre que, para essas componentes harmônicas, a corrente no condutor de neutro será três vezes maior que a corrente de terceira ordem em cada fase (PROCOBRE, 2001).

Conforme Oliveira (2010), mesmo em um sistema trifásico com cargas equilibradas pode ocorrer um aumento na corrente do condutor do neutro, em função das harmônicas homopolares, que se somam no neutro por estarem em fase entre si, podendo acarretar um sobreaquecimento perigoso se não existir dimensionamento adequado.

De acordo com Schwarz (2006), para impedir que as harmônicas *triplens*¹ se propaguem a montante do sistema se utiliza transformadores com um dos enrolamentos conectados em delta, aprisionando as correntes das harmônicas de 3ª ordem e as múltiplas ímpares de três no respectivo enrolamento; em compensação as correntes das harmônicas geram perdas e aumento de temperatura no transformador.

Para minimizar os efeitos das harmônicas homopolares, uma das alternativas é utilizar filtros passivos, para aprisionar as harmônicas e impedir a circulação da mesma a montante do sistema, evitando a necessidade de superdimensionar o condutor de neutro em instalações em virtude das cargas não-lineares.

2.2 Normas e recomendações

Em virtude dos problemas causados pela distorção harmônica nas instalações elétricas estabeleceram-se normas e recomendações para limitar os níveis de distorção harmônica, assegurando a qualidade da energia e o funcionamento adequado do sistema elétrico.

Os limites de distorção harmônica no Brasil são regulamentados pela ANEEL, por meio do módulo 8 do Procedimento de Distribuição (ANEEL, 2018), no entanto a normativa nacional não avalia a distorção harmônica da corrente na

¹ Harmônicas de 3ª ordem e as múltiplas ímpares de três.

instalação, podendo desta maneira utilizar as recomendações da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), sendo a normativa internacional mais rigorosa.

2.2.1 PRODIST, Módulo 8

O módulo 8 do Procedimento de Distribuição (ANEEL, 2018), estabelece os procedimentos referente ao fenômeno dos harmônicos em regime permanente, definindo os limites de referência do fenômeno da qualidade do produto e a metodologia de medição.

Na Figura 1, são apresentados os termos e informações mencionados na normativa nacional para o cálculo das distorções harmônicas da tensão, os quais estão relacionados à distorção na forma de onda da tensão, quando comparada com a onda senoidal na frequência fundamental.

Figura 1 – Terminologia do módulo 8 do PRODIST

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DTI_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$h_{máx}$
Ordem harmônica mínima	h_{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p,95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i,95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{3,95\%}$

Fonte: ANEEL (2018).

As grandezas $DIT_h\%$, $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$, são calculadas conforme as Equações 5, 6, 7, 8 e 9 (ANEEL, 2018), onde o espectro harmônico a ser considerado deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 40ª ordem harmônica:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (5)$$

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

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

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

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (9)$$

Onde:

$DIT_h\%$ = Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

$DTT\%$ = Distorção harmônica total de tensão

$DTT_p\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

$DTT_i\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

$DTT_3\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

V_h = Tensão harmônica de ordem h

h = Ordem harmônica

h_{máx} = Ordem harmônica máxima

h_{mín} = Ordem harmônica mínima

Os limites das distorções harmônicas totais das tensões em percentual da tensão fundamental medida, estão relacionados com o nível de tensão no barramento, Figura 2, sendo estes os valores máximos permitidos.

Figura 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{195%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2018).

Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser realizadas de acordo com tipo de ligação do acessante, isto é, entre as tensões fase-neutro no ponto de conexão, e caso o neutro não esteja disponível no ponto de conexão, a medição deve ser executada entre as tensões de fase-fase.

2.2.2 IEEE Std 519-2014

Visto que a normativa nacional não avalia a distorção harmônica da corrente, pode-se recorrer as recomendações da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), que estabelece os limites dos componentes harmônicos no Ponto de Conexão Comum (PCC), localizado entre o consumidor e as concessionárias de energia elétrica. Para unidades comerciais (universidades, shopping centers, etc.) alimentadas por meio de um transformador, o PCC é comumente do lado da baixa tensão.

A Tabela 1, apresenta os limites das componentes harmônicas de corrente no PCC, para consumidores conectados a sistemas de baixa tensão, de 120 V a 69 kV, sendo que os limites dependem do nível de corrente de curto-circuito e da componente fundamental de corrente medida no PCC (IEEE, 2014).

Tabela 1 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas classificados de 120 V a 69 kV.

Distorção Harmônica Máxima da Corrente em Percentagem de I_L						
h: Ordem das Harmônicas Ímpares ^{a, b}						
I_{sc} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	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

^a As harmônicas pares são limitadas a 25% do limite da harmônica ímpar imediatamente superior;

^b Não é permitido componente contínua, por exemplo, conversores de meia-onda;

^c Todos os equipamentos de geração de energia são limitados a esses valores de distorção de corrente, independentemente da capacidade de curto-circuito I_{sc} / I_L .

Sendo:

I_{sc} : Corrente de curto-circuito máxima no PCC;

I_L : Corrente máxima demandada pela carga na componente de frequência fundamental no PCC, em condições normais de operação de carga, sendo recomendado a soma das correntes correspondentes à demanda máxima em cada um dos doze meses anteriores divididos por 12.

Fonte: IEEE Std 519-2014 (2014).

A regulamentação IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014) será utilizada como referência para a análise do IFSC – Câmpus Florianópolis, sendo a corrente de curto-circuito obtida de acordo com as Equações (10), (11) e (12).

$$Z_B = \frac{(V_L)^2}{S_{trafo}} \quad (10)$$

$$Z_{trafo} = Z_{pu} \cdot Z_B \quad (11)$$

$$I_{SC} = \frac{V_F}{Z_{trafo}} \quad (12)$$

Onde:

I_{SC} = Corrente de curto-circuito

V_F = Tensão de fase

V_L = Tensão de linha

S_{trafo} = Potência trifásica nominal do transformador

Z_B = Impedância de base

Z_{pu} = Impedância percentual do transformador

Z_{trafo} = Valor da impedância do transformador

2.3 Caracterização de consumidores da classe comercial

Instalações consumidoras de classe comercial (shoppings centers, universidades, supermercados, etc.), apresentam diversos equipamentos eletrônicos, como condicionadores de ar, computadores, luminárias com lâmpadas de LED, entre outros. A grande maioria dos dispositivos, apresentam no estágio de entrada um retificador monofásico com filtro capacitivo responsável pela distorção na forma de onda da corrente e conseqüentemente a injeção de harmônicos de corrente na rede.

Segundo Oliveira (2010), uma unidade de classe comercial apresenta algumas características, como cargas monofásicas com baixas potências individuais, potência total da instalação elevada, baixo fator de deslocamento em virtude de condicionadores de ar e motores e conteúdo harmônico de 3ª ordem elevado.

2.3.1 Análise do IFSC – Câmpus Florianópolis

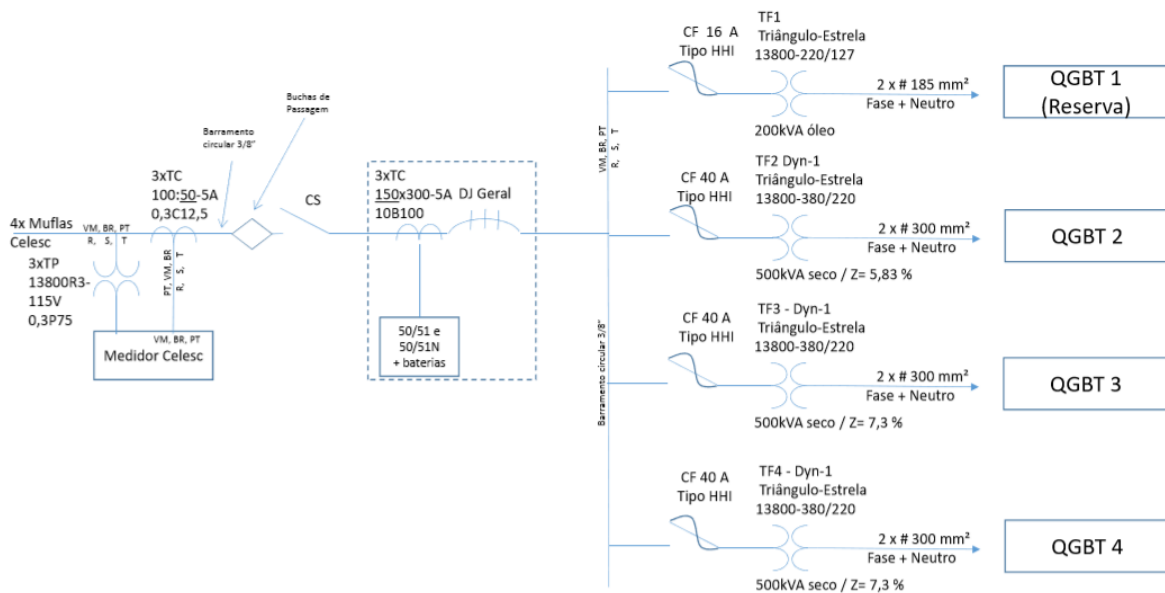
Em virtude do crescimento no número de cursos e alunos, a consulta do plano diretor realizada em 2012, indicou que a área edificada do Câmpus precisaria aumentar cerca de 22 mil m² até o ano de 2032, quase dobrando a área construída. Uma vez que a ampliação está relacionada com a construção de laboratórios, área administrativa e área comunitária, haverá um aumento significativo na quantidade de aparelhos como condicionadores de ar, computadores, lâmpadas LED, etc.

Dado o aumento da quantidade de equipamentos eletrônicos na instituição, é prevista uma demanda de energia elétrica considerável para os próximos anos, além disso, a substituição das lâmpadas tradicionais por lâmpadas LED na iluminação do Câmpus traz preocupação em relação à qualidade de energia, devido a presença de correntes harmônicas.

2.3.1.1 Caracterização da Instalação Elétrica

O IFSC, Câmpus Florianópolis, possui uma subestação abrigada de 13,8 kV, responsável por distribuir a potência entre um transformador trifásico a óleo de 200 kVA (220/127 V) e três transformadores trifásicos a seco de 500 kVA (380/220 V). Essa subestação possui quatro quadros gerais de baixa tensão (QGBT-1..4) sendo que o QGBT-3 e o QGBT-4 possuem banco de capacitores automatizados, sem a presença de filtros de harmônicas (DUPCZAK et al., 2018). A conexão dos elementos da subestação é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama Unifilar da Subestação



Fonte: Arquivo IFSC – Câmpus Florianópolis (2016).

A Figura 4 fornece as características no ponto de conexão da unidade comercial, IFSC – Câmpus Florianópolis, por meio das informações fornecidas pela concessionária (CELESC).

Figura 4 - 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: Adaptado da CELESC (2018).

2.3.1.2 Distorção harmônica da corrente

De acordo com Dupczak et al. (2018), as medições realizadas pela instituição no PCC, a montante dos QGBTs, permitem verificar que o QGBT-4 não atende os limites propostos pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), uma vez que, em duas fases, o limite de 8% da distorção total da demanda (TDD) é excedido, bem como o limite de 7% para as componentes harmônicas ímpares entre a 3ª e 11ª ordem, conforme observa-se na Figura 5.

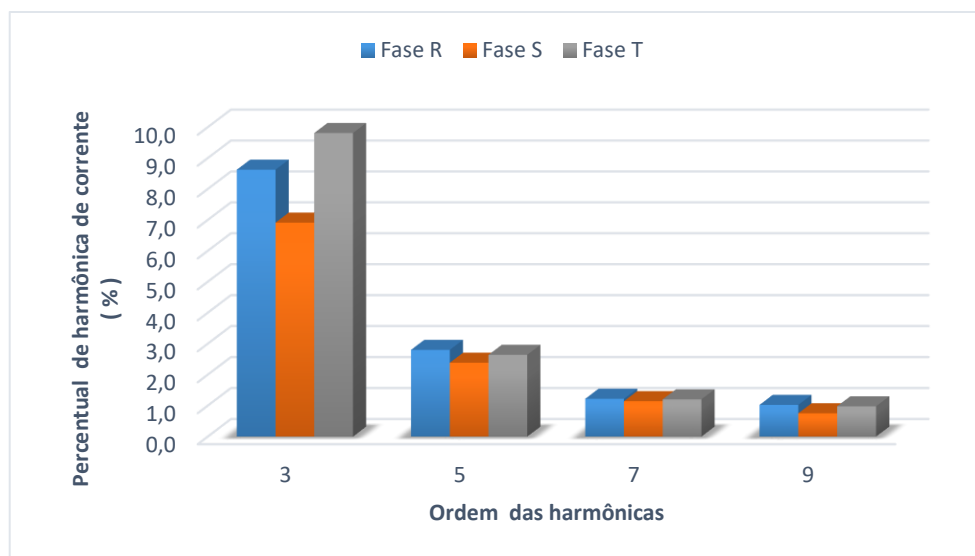
Figura 5 - Percentuais de harmônicas e da TDD das fases dos QGBTs.

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

Fonte: DUPCZAK *et al.* (2018).

Por meio dos dados fornecidos pela instituição, pode-se constatar que no QGBT-4 o valor percentual da componente harmônica de 3ª ordem tem predominância no limite extrapolado para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre a 3 e 11, e conseqüentemente na TDD, conforme mostrado na Figura 6.

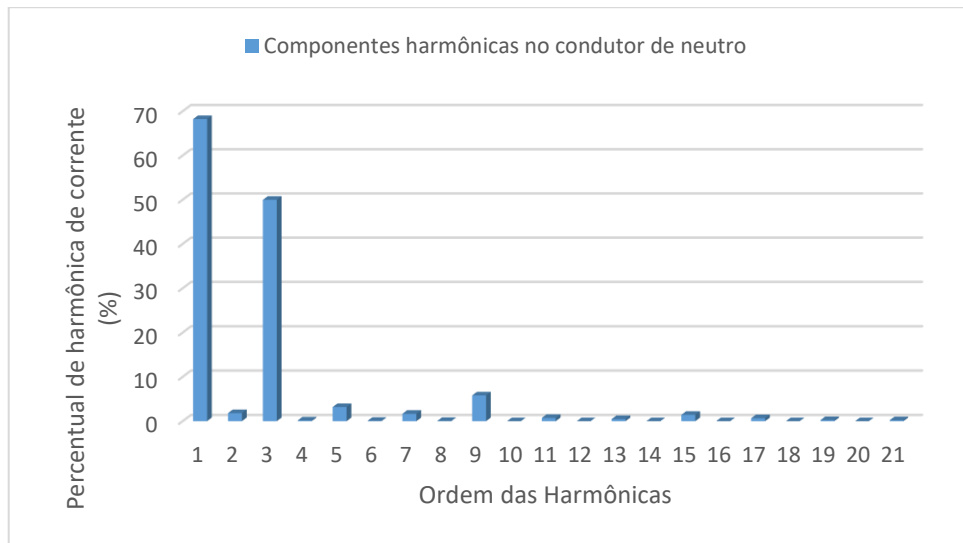
Figura 6 – Harmônicas de ordem ímpar entre 3 e 11



Fonte: Elaboração Própria (2018).

Além disso, verifica-se que a corrente do condutor de neutro no QGBT-4 está relacionada principalmente ao desequilíbrio entre as correntes de fase e a presença de harmônicos homopolares, com a maior influência da componente de terceira harmônica, conforme mostra a Figura 7.

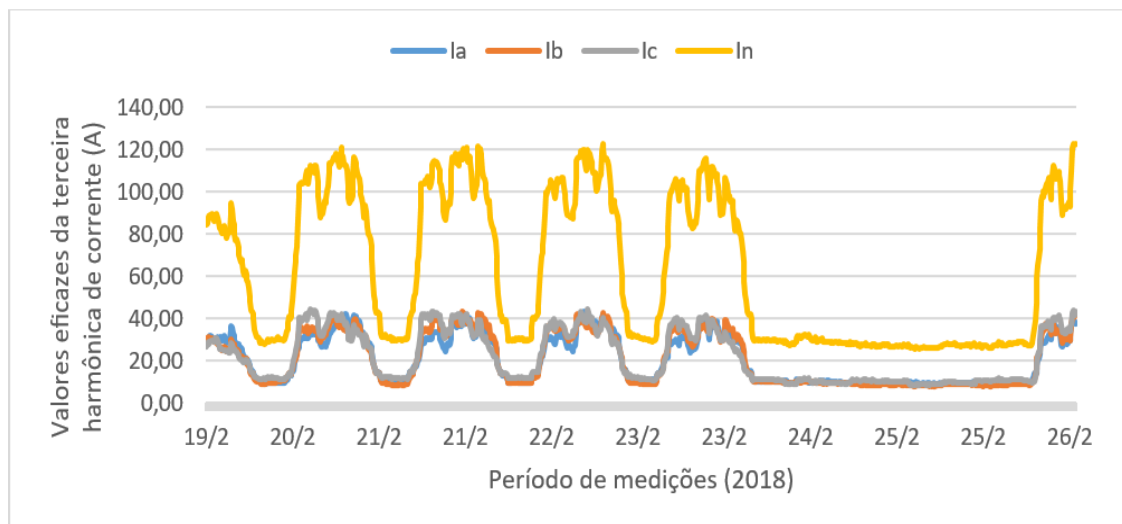
Figura 7 - Amplitude percentual das componentes harmônicas de corrente no condutor de neutro, em relação ao valor eficaz total



Fonte: Elaboração Própria (2018).

Segundo Dupczak et al. (2018), a corrente harmônica de terceira ordem do condutor de neutro corresponde praticamente ao valor da soma das correntes de terceira harmônica em cada fase do QGBT-4, conforme verificado na Figura 8.

Figura 8 - Valores eficazes da terceira harmônica de corrente no QGBT-4



Fonte: Adaptado de DUPCZAK et al. (2018).

Portando, com a redução da componente de terceira harmônica do QGBT-4, se pode adequar o respectivo quadro aos limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), e conseqüentemente reduzir a sobrecarga no neutro e da instalação, liberando o sistema para conexão de novas cargas sem a necessidade de ampliação da subestação.

2.4 FILTRO PASSIVO

Os filtros passivos são empregados quando é necessário reduzir as tensões e correntes harmônicas presentes em uma determinada instalação, em virtude das normas e recomendações vigentes.

2.4.1 Filtro *shunt* LC série

Segundo Kassick (2016), os filtros passivos sintonizados criam caminhos de baixa impedância, aprisionando as harmônicas de corrente presentes na instalação, e conseqüentemente evitando a injeção dos harmônicos na rede. A conexão dos filtros passivo LC série, em paralelo com as cargas no PCC do sistema, possibilita simultaneamente a correção do fator de deslocamento, F_{Desl} , através do efeito dos capacitores (na frequência de 60 Hz) e a correção do fator de distorção, F_{Dist} , por meio da filtragem.

O filtro *shunt* é projetado para que as frequências de ressonância tenham as mesmas frequências das harmônicas, permitindo a circulação de uma corrente na frequência da harmônica para a qual foi projetado e uma corrente de componente fundamental. Isso ocorre em virtude dos filtros LC série serem vistos pela fonte de tensão como um capacitor equivalente, uma vez que o valor da reatância capacitiva é predominante em relação à reatância indutiva, para a frequência fundamental (NERY; HOPNER, 2016).

De acordo com Schwarz (2006), o filtro *shunt* LC série é dimensionado, de modo que a frequência da harmônica seja a mesma da frequência de ressonância, Equação 13.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sh}C_{sh}}} \quad (13)$$

Onde:

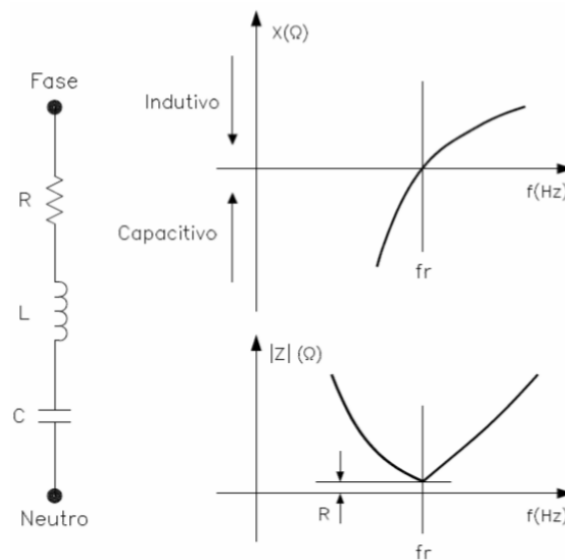
f_o = Frequência de ressonância série

L_{sh} = Indutância do filtro *shunt*

C_{sh} = Capacitância do filtro *shunt*

Para Schwarz (2006), o comportamento da impedância equivalente do filtro em função da frequência possui um aumento significativo em frequências distintas da frequência de ressonância, fazendo com que qualquer mudança no valor do capacitor e do indutor se torne um grande problema no projeto, devido a tolerância dos elementos. Quando se supera o valor da frequência de ressonância, a impedância do filtro passa a ser indutiva, com um comportamento linear, alternativamente, quando a frequência se altera levemente para um valor inferior à frequência de ressonância, a impedância passa a ser capacitiva, conforme verifica-se na Figura 9.

Figura 9 - Comportamento da impedância do filtro shunt no espectro de frequências



Fonte: SCHWARZ (2006).

Para dimensionar um filtro mais robusto, deve-se projetar uma relação de capacitor e indutor que acarrete em uma curva mais “aberta”, na medida em que a variação na frequência de ressonância série, devido à tolerância no valor do capacitor, não comprometa o bom funcionamento do filtro.

Para Pereira (1999), a resistência do filtro *shunt* (R_{sh3}), determina o fator de qualidade do indutor do filtro, conforme a Equação 14.

$$Q_{sh3} = \frac{\omega L}{R_{sh3}} \quad (14)$$

Onde:

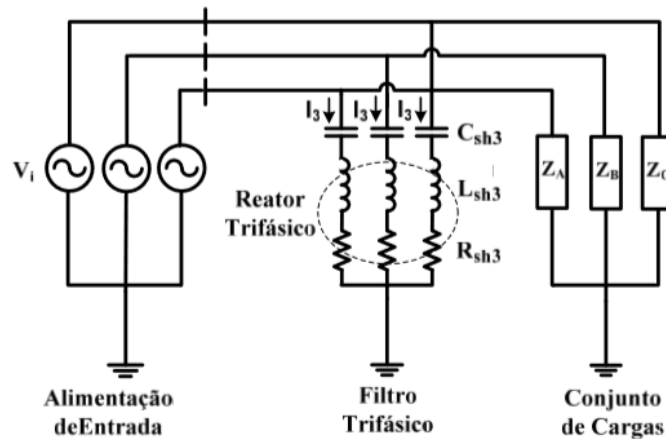
Q_{sh3} = Fator de qualidade do indutor do filtro com reator trifásico

L_{sh3} = Indutância de cada fase do filtro *shunt* com reator trifásico

R_{sh3} = Resistência de cada fase do filtro *shunt* com reator trifásico

O filtro LC série possui a configuração da Figura 10, quando conectado em estrela no sistema trifásico, onde apresenta um banco de capacitores e o filtro para cada componente harmônica, sendo este um filtro trifásico com reator trifásico ou três filtros monofásicos (Oliveira, 2010).

Figura 10 - Filtro trifásico com reator trifásico



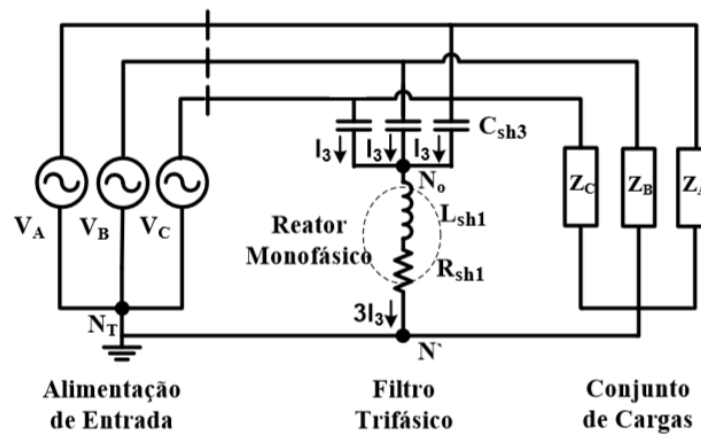
Fonte: OLIVEIRA (2010).

2.4.2 Filtro *shunt* LC série trifásico com reator monofásico

O filtro *shunt* LC série conectado em estrela no sistema trifásico, apresenta um banco de capacitores em série com o reator trifásico, isto é, para os filtros sintonizados em frequência homopolares, as correntes harmônicas percorrem o banco de capacitores, e posteriormente o reator trifásico, para em seguida se somarem no ponto de conexão com o neutro (TEIXEIRA, 2009).

Conforme Oliveira (2010), o filtro LC série com reator monofásico, topologia 3C1L, apresenta uma configuração derivada do filtro *shunt* série trifásico, conforme mostra a Figura 11, cuja ideia é realizar a soma das correntes, antes da conexão com o reator, sem que o filtro perca suas características de filtragem.

Figura 11 - Filtro *shunt* LC série trifásico com reator monofásico



Fonte: OLIVEIRA (2010).

Dessa maneira, o filtro *shunt* 3C1L só pode ser projetado para correntes harmônicas homopolares, devido as peculiaridades das harmônicas múltiplas ímpares de três, não sendo viável a filtragem de correntes harmônicas que apresentam defasagem diferente de zero entre si. Desta maneira, os três indutores de cada harmônica *triplens*, devido à conexão em paralelo dos reatores trifásicos podem ser substituídos por apenas um reator monofásico, com valor de indutância igual ao valor original dividido por três (OLIVEIRA, 2010).

De acordo com Quadros (1999), para que não ocorra a perda de sintonia no filtro, uma vez reduzida a indutância é necessário aumentar a capacitância, sendo que quanto maior o valor da capacitância, e consequentemente menor o valor do indutor, maior será a largura de banda do filtro.

3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

3.1 MODELAGEM DE SISTEMAS ELÉTRICOS COMERCIAIS

Para projetar os filtros passivos sintonizados é necessário modelar três situações de carga típica de instalações comerciais de baixa tensão (QUADROS, 1999):

- a) Sistema trifásico com cargas monofásicas equilibradas: sistema ideal que representa melhor desempenho no projeto de filtragem passiva de harmônicos. Visto que as grandezas elétricas das três fases do sistema apresentam mesmo módulo e defasagem, isto é, as harmônicas não homopolares e homopolares, apresentam respectivamente defasagem de 120° e 0° entre si.
- b) Sistema trifásico com cargas monofásicas de elevado desequilíbrio harmônico: sistema idealizado que apresenta a situação mais crítica do projeto de filtragem passiva de harmônicos, uma vez que as componentes harmônicas de corrente das três fases apresentam diferenças significativas em módulo e em fase;
- c) Sistema trifásico real: sistema real de projeto, representa uma situação típica de uma instalação elétrica comercial de baixa tensão, apresentando características das situações anteriores.

Neste capítulo serão modeladas as três situações mencionadas, verificando o desempenho de filtragem para cada situação, considerando os tipos de cargas instaladas e os níveis de distorção harmônica encontradas nas medições realizadas pela instituição.

3.1.1 Modelagem da planta elétrica da instalação

Conforme Schwarz (2006), a análise de cargas não-lineares em regime permanente pode ser realizada por meio da Série de Fourier, onde apresenta um somatório de infinitas funções senoidais de frequências múltiplas da frequência

fundamental, considerando, portanto, a injeção de fontes de corrente de harmônicas lineares.

As distorções harmônicas de corrente drenada por dispositivos não-lineares são constantes, dado que o sistema da concessionária não afeta significativamente os dados da instalação.

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).

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.

Portanto, o módulo da impedância equivalente pode ser obtido através da Equação 15.

$$|Z_1| = \frac{V_{1,ef}}{I_{1,ef}} \quad (15)$$

Onde:

Z_1 = Módulo da impedância equivalente

$V_{1,ef}$ = Valor da tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental obtido nas medições

$I_{1,ef}$ = Valor da corrente eficaz da componente fundamental obtido nas medições

A partir do módulo da impedância equivalente e do ângulo da corrente fundamental, podem-se determinar os componentes lineares R e L, de acordo com as Equações 16 e 17.

$$R = |Z_1| \cdot \cos(\varphi_1) \quad (16)$$

$$X_L = |Z_1| \cdot \sin(\varphi_1) \quad (17)$$

Onde:

Z_1 = Módulo da impedância equivalente

R = Valor da resistência da carga linear

X_L = Valor da reatância indutiva da carga linear

φ_1 = Valor do ângulo da corrente fundamental

Sendo a indutância da carga linear determinada pela Equação (18).

$$L = \frac{X_L}{2\pi \cdot f_r} \quad (18)$$

Onde:

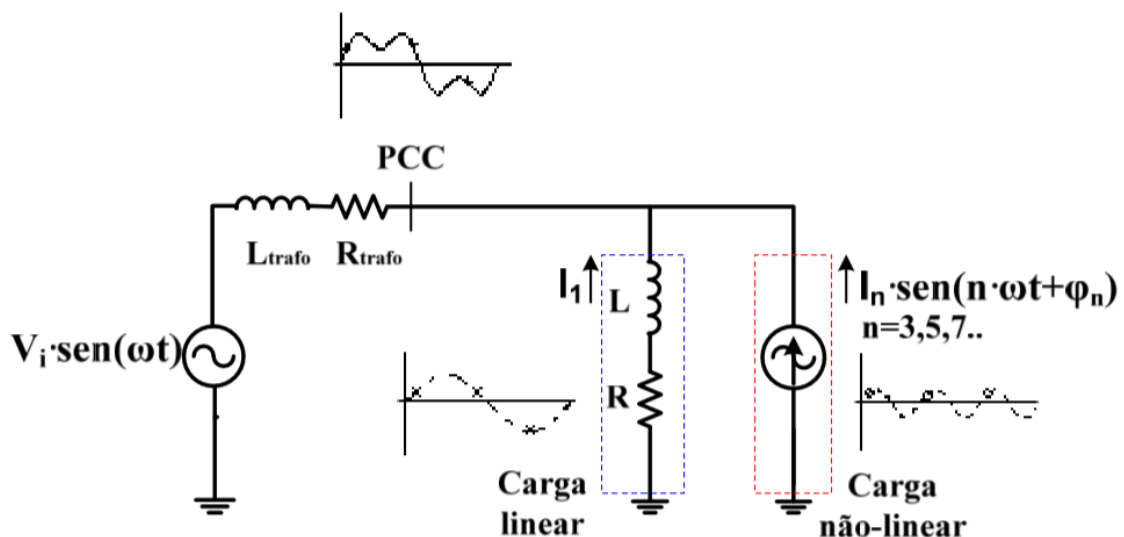
L = Valor da indutância da carga linear

X_L = Valor da reatância indutiva da carga linear

f_r = Frequência da rede de alimentação

De acordo com Oliveira (2010), os dispositivos não-lineares drenam correntes na frequência fundamental e em frequências harmônicas. Dessa maneira, uma carga não-linear pode ser modelada como uma carga do tipo RL, responsável por drenar corrente na frequência fundamental, e em paralelo a esta carga, fontes de corrente com frequências, amplitudes (I_n) e ângulos (φ_n) iguais as harmônicas medidas na instalação comercial. Sendo assim, por meio da solução de circuitos lineares, determina-se a corrente total no PCC, conforme verifica-se na Figura 12.

Figura 12 – Modelagem por fontes de corrente



Fonte: OLIVEIRA (2010).

Para avaliar a metodologia proposta, será utilizado o *software* PSIM (POWERSIMTECH, 2010), com intuito de verificar se os dados da simulação numérica

estão de acordo com as medições realizadas, e posteriormente, avaliar os filtros *shunt* LC série trifásico com reator monofásico (3C1L).

3.1.2 Modelagem do filtro *shunt* 3C1L

A metodologia utilizada para o dimensionamento dos elementos do filtro com topologia 3C1L é semelhante a metodologia aplicada no projeto do filtro trifásico com reator trifásico.

Segundo Kassick (2016), o valor de capacitância, C_{sh} , do banco de capacitores do filtro *shunt* está relacionado com a correção do fator de deslocamento da instalação elétrica, isto é, para determinar o banco de capacitores é necessário calcular o fator de deslocamento, de acordo com a Equação (19).

$$FP = F_{Desl} \cdot F_{Dist_i} \cdot F_{Dist_v} \quad (19)$$

Onde:

FP = Fator de potência

F_{Desl} = Fator de deslocamento

F_{Dist_i} = Fator de distorção de corrente

F_{Dist_v} = Fator de distorção de tensão

Para obtenção dos valores dos fatores de distorção de tensão e corrente, são utilizadas as Equações (20) e (21) .

$$F_{Dist_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_v)^2}} \quad (20)$$

$$F_{Dist_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_i)^2}} \quad (21)$$

Onde:

F_{Dist_i} = Fator de distorção de corrente

F_{Dist_v} = Fator de distorção de tensão

THD_i = Distorção Harmônica Total da Corrente

THD_v = Distorção Harmônica Total da Tensão

Uma vez obtido o fator de deslocamento, pode-se determinar o ângulo de deslocamento entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, através da Equação (22).

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(F_{Desl}) \quad (22)$$

Onde:

F_{Desl} = Fator de deslocamento

φ_1 = Valor do ângulo da corrente fundamental

Conforme Oliveira (2010), para obter um fator de deslocamento unitário, o valor da potência reativa capacitiva, Q_{cap} , fornecida por fase, deve ser igual ao valor da potência reativa de deslocamento, Q_{desl} . Portanto, o valor da capacitância por fase do filtro *shunt*, C_{sh} , pode ser obtido por meio da Equação (23).

$$C_{sh} = \frac{I_{1,ef} \cdot \sin(\varphi_1)}{V_{1,ef} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_r} \quad (23)$$

Onde:

C_{sh} = Capacitância por fase do filtro *shunt*

f_r = Frequência da rede de alimentação

$I_{1,ef}$ = Valor da corrente eficaz da componente fundamental obtido nas medições

$V_{1,ef}$ = Valor da tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental obtido nas medições

φ_1 = Valor do ângulo da corrente fundamental

O módulo 8 do Procedimento de Distribuição (ANEEL, 2018), estabelece que para uma unidade consumidora com tensão inferior a 230 kV, o fator de deslocamento indutivo ou capacitivo no ponto de conexão, tem como limite mínimo permitido 0,92 (noventa e dois centésimos), conforme regulamentação vigente.

De acordo com Oliveira (2010), uma vez estabelecida a capacitância por fase (C_{sh}), deve-se dimensionar o reator trifásico para que o mesmo sintonize o filtro *shunt* na frequência de ressonância que se deseja atuar. O valor da indutância do reator trifásico (L_{sh3}) pode ser calculado com auxílio da Equação (24).

$$L_{sh3} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot h \cdot f_r)^2 \cdot C_{sh}} \quad (24)$$

Onde:

C_{sh} = Capacitância por fase do filtro *shunt*

f_r = Frequência da rede de alimentação

h = Ordem harmônica

L_{sh3} = Indutância de cada fase do filtro *shunt* com reator trifásico

Como foi visto no capítulo 2, o filtro *shunt* 3C1L pode ser projetado somente para correntes harmônicas de sequência zero, que por estarem em fase entre si, possibilitam substituir os três indutores de cada harmônica múltipla ímpar de 3 conectado em estrela no sistema trifásico, por apenas um reator monofásico com indutância igual ao valor original dividido por três, conforme a Equação (25).

$$L_{sh1} = \frac{L_{sh3}}{3} \quad (25)$$

Onde:

f_r = Frequência da rede de alimentação

h = Ordem harmônica

L_{sh1} = Indutância do filtro *shunt* com reator monofásico

L_{sh3} = Indutância de cada fase do filtro *shunt* com reator trifásico

A resistência do filtro *shunt* na configuração 3C1L (R_{sh1}) pode ser determinada por meio da Equação (26).

$$R_{sh1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot f_r \cdot L_{sh1}}{Q_{sh1}} \quad (26)$$

Onde:

L_{sh1} = Indutância do filtro *shunt* com reator monofásico

Q_{sh1} = Fator de qualidade do indutor do filtro com reator monofásico

R_{sh1} = Resistência de cada fase do filtro *shunt* com reator monofásico (não-idealidade do indutor L_{sh1})

O fator de qualidade muito elevado para os filtros sintonizados acarreta em uma boa seletividade e baixas perdas. No entanto, implica em um sistema pouco amortecido, podendo gerar oscilações elevadas no período transitório em função das operações de manobra dos filtros (TEIXEIRA, 2009).

Deste modo, o fator de qualidade do filtro sintonizado está associado diretamente a perda de sintonia e inversamente a perda de energia.

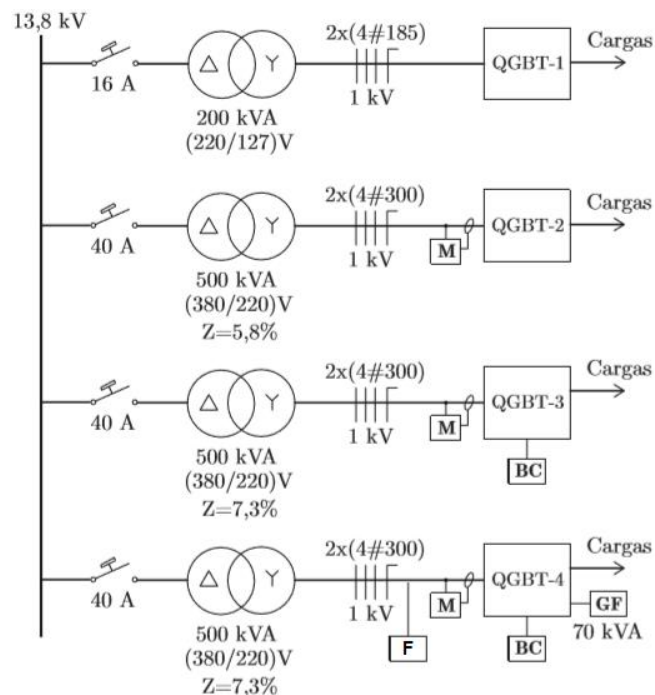
Observar que quanto maior o fator de qualidade Q , menor será a perda de energia no filtro e a banda passante será mais estreita, levando à possibilidade de perda de sintonia devido às variações paramétricas do filtro com a variação de temperatura, corrente, envelhecimento, ... Filtros com fator Q baixo apresentam banda passante larga, estando menos susceptíveis à perda de sintonia, tendo porém, perdas mais elevadas (KASSICK, 2016, p.76).

4 ESTUDO DE CASO

A pesquisa utilizará dados da subestação do IFSC – Câmpus Florianópolis, com intuito de analisar e projetar unidades de filtragem para adequar o nível da terceira harmônica de corrente. Dessa forma, busca-se reduzir a sobrecarga no condutor de neutro a montante do QGBT-4, analisar o fluxo das harmônicas entre os transformadores da subestação e avaliar a distorção total da demanda da corrente, de acordo com a recomendação da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014).

Na Figura 13 observa-se os locais de estudo na subestação abrigada de 13,8 kV. As caixas com a letra M representam os locais onde foram realizadas as medições de tensão e corrente pela instituição. A geração de energia fotovoltaica e os bancos de capacitores estão representados pelas caixas com as inscrições BC e GF respectivamente (DUPCZAK et al., 2018). O local de conexão do filtro *shunt* 3C1L está representado pela caixa com a letra F.

Figura 13 – Diagrama unifilar simplificado da subestação com a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Adaptado de DUPCZAK et al. (2018).

Para o estudo de caso em questão, será realizada a modelagem da planta elétrica comercial para as três situações de carga típica de instalações comerciais de baixa tensão.

4.1 MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA

Para elaborar o modelo da planta elétrica realizou-se o levantamento das informações da impedância do alimentador, que corresponde a impedância acumulada no ponto de conexão fornecida pela concessionária (capítulo 2), através dos dados obtidos determinou-se a resistência e reatância indutiva do alimentador com o auxílio das Equações (27) e (28).

$$R_{al} = R1_{pu} \cdot Z_{base} \quad (27)$$

$$X_{al} = X1_{pu} \cdot Z_{base} \quad (28)$$

Onde:

R_{al} = Valor da resistência do alimentador

$R1_{pu}$ = Valor da resistência acumulada no ponto de conexão da concessionária em pu

R_{base} = Valor da resistência base no ponto de conexão da concessionária

X_{al} = Valor da reatância do alimentador

$X1_{pu}$ = Valor da reatância acumulada no ponto de conexão da concessionária em pu

X_{base} = Valor da reatância base no ponto de conexão da concessionária

f_r = Frequência da rede de alimentação

Posteriormente, calculou-se o valor da indutância do alimentador, conforme a Equação (29).

$$L_{al} = \frac{X_{al}}{2 \cdot \pi \cdot f_r} \quad (29)$$

Onde:

L_{al} = Valor da indutância do alimentador

X_{al} = Valor da reatância do alimentador

f_r = Frequência da rede de alimentação

As características do alimentador da subestação do IFSC – Câmpus Florianópolis, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do alimentador

Grandeza	Valor
R_{al}	618,93 mΩ
X_{al}	2081,51 mΩ
L_{al}	5,52 mH

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para obter o modelo do sistema realizou-se uma avaliação dos transformadores, onde verificou que o transformador trifásico a óleo de 200 kVA (220/127 V) do QGBT-1 está desativado e portanto não fará parte desse estudo, no entanto a instalação possui mais três transformadores trifásicos a seco de 500 kVA (380/220 V), dos respectivos quatro gerais de baixa tensão (QGBT-2..4), sendo o QGBT-2 alimentado através do transformador produzido pela CONTRAFO S.A (ANEXO 1), e os demais QGBTs em uso alimentados por transformadores produzidos pela empresa ONIX (ANEXO 2).

Os parâmetros elétricos de cada transformador podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos transformadores dos respectivos QGBTs

QGBT	Potência (kVA)	Impedância (%)	Tipo de ligação ^a	Tensão nominal (V)
2	500	5,83	Delta/Estrela	13,8k/380
3	500	7,30	Delta/Estrela	13,8k/380
4	500	7,30	Delta/Estrela	13,8k/380

^a Todos os transformadores da subestação estão conectados na topologia Dyn1.
Sendo:
Dyn1: Transformador trifásico ligado em Delta-Estrela, com neutro acessível no lado de baixa tensão e com deslocamento angular 30°, sendo as fases de baixa tensão atrasadas em relação a alta tensão.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Conforme se verifica nas placas de identificação dos transformadores os mesmos foram fabricados em conformidade com a norma NBR 10295, sendo a respectiva norma cancelada e substituída pela norma NBR 5356. Portanto, para realizar a modelagem dos transformadores considerou-se a norma vigente.

A Tabela 4 apresenta os valores das perdas estabelecidas pela NBR 5356 (ABNT, 2016) para transformadores trifásicos com tensão máxima de 15 kV, considerando os transformadores com nível de eficiência D, sendo este o caso mais crítico já que as placas de identificação não informam o nível de eficiência.

Tabela 4 – Perdas nominais dos transformadores dos respectivos QGBTs de acordo com NBR 5356

QGBT	Potência (kVA)	Perdas a vazio (W)	Perdas totais (W)	Rendimento (%)
2	500	1800	9000	98,46
3	500	1800	9000	98,46
4	500	1800	9000	98,46

Fonte: Elaboração própria (2019).

A resistência (R_{trafo}) e a Indutância (X_{trafo}) dos transformadores refletidas no enrolamento de baixa tensão foram calculadas considerando as perdas nos enrolamentos dos transformadores de acordo com as Equações (30), (31), (32) e (33).

$$Z_{trafo} = \frac{V_{BT,L}^2}{S_{trafo}} \cdot Z_{pu} \quad (30)$$

$$R_{trafo} = \frac{P_{cobre}}{I_{BT,n}^2} \quad (31)$$

$$X_{trafo} = \sqrt{Z_{trafo}^2 - R_{trafo}^2} \quad (32)$$

$$L_{trafo} = \frac{X_{trafo}}{2 \cdot \pi \cdot f_r} \quad (33)$$

Onde:

Z_{trafo} = Valor da impedância do transformador

$V_{BT,L}^2$ = Tensão de linha no enrolamento de baixa tensão

Z_{pu} = Impedância percentual do transformador

S_{trafo} = Potência trifásica nominal do transformador

R_{trafo} = Valor da resistência do transformador

P_{cobre} = Perdas nos enrolamentos do transformador

$I_{BT,n}$ = Corrente nominal no enrolamento de baixa tensão do transformador

X_{trafo} = Valor da reatância do transformador

L_{trafo} = Valor da indutância do transformador

f_r = Frequência da rede de alimentação

Na Tabela 5 estão os valores de resistência e indutância dos transformadores dos respectivos QGBTs.

Tabela 5 – Características elétricas dos transformadores

QGBT	Impedância (mΩ)	Resistência (mΩ)	Reatância (mΩ)	Indutância (μH)
2	16,84	4,16	16,32	43,28
3	21,08	4,16	20,67	54,82
4	21,08	4,16	20,67	54,82

Fonte: Elaboração própria (2019).

A modelagem da carga foi elaborada, de acordo com o capítulo 3, sendo realizada a modelagem para as três situações de carga típica de instalações comerciais de baixa tensão.

Para elaborar a modelagem da planta elétrica, arbitraram-se os dados de estudo em 33% dos maiores valores da corrente demandada nas medições, visto que em períodos onde o valor médio da corrente demandada é relativamente baixo, as respectivas fases apresentam uma elevada THDi. No entanto, as amplitudes das componentes harmônicas homopolares são pequenas quando comparadas com as harmônicas homopolares obtidas no período onde ocorre o maior valor de carga demandada.

4.1.1 Sistema trifásico equilibrado

A modelagem da planta elétrica comercial para o sistema trifásico com cargas monofásicas equilibradas, sistema ideal, foi realizada de acordo com a metodologia adotada no capítulo 3, com intuito de obter um modelo da planta elétrica que apresente uma boa aproximação com os valores obtidos nas medições realizadas pela instituição.

As taxas de distorção harmônica da corrente e da tensão nas três fases dos QGBTs foram calculadas para cada ponto de medição, obtendo em seguida o valor percentil de 95% para cada conjunto de dados, sendo posteriormente realizada

a média aritmética dos valores percentis das três fases para cada QGBT, sendo este o respectivo valor utilizado para a modelagem do sistema equilibrado.

A corrente demandada na frequência fundamental para cada QGBT no sistema equilibrado foi determinada pela média aritmética dos valores percentis de 95% de cada conjunto de dados das três fases.

Contudo, os valores da tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental, do fator de potência, da potência aparente e da potência ativa foram determinados pela média aritmética do conjunto de valores correspondentes as três fases de cada QGBT.

Os resultados obtidos após o tratamento dos dados adquiridos nas medições estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema equilibrado

QGBT	Fase	$V_{1,ef}$ (V)	$I_{1,ef}$ (A)	FP	THD_i (%)	THD_v (%)	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: Elaboração própria (2019).

Para determinar a carga monofásica do tipo RL, foi necessário primeiramente estimar a potência reativa injetada pelos bancos capacitivos conectados em delta nos QGBT-3 e QGBT-4, sendo que os respectivos bancos de capacitores apresentam seis estágios, sendo os dois primeiros estágios compostos por unidades capacitivas de 45,90 μ F (2,50 kVAr/380V), e os demais estágios constituídos por unidades de 91,84 μ F (5,0 kVAr/380 V).

Por meio do termo de referência (IFSC, 2009), verificou-se que a potência reativa de 75 kVAr de cada banco capacitivo foi dimensionada para que, na potência nominal do relativo transformador (500 kVA) dos QGBT-3 e QGBT-4, com todos os módulos inseridos, o fator de deslocamento corrigido atingisse o valor de 0,92 supondo operação equilibrada para as 3 fases. Portanto, sem o banco de capacitores, o fator de deslocamento seria de 0,84, podendo estimar a potência indutiva em 270 kVAr e a potência ativa de 420 kW, com os transformadores operando na potência aparente nominal de 500 kVA.

Para determinar a potência reativa injetada nos QGBTs pelo banco de capacitores conectados em delta, foram tratados os dados das medições fornecidas pela instituição e recalculado o triângulo de potências. Os resultados dos valores de potências nos QGBTs realizados para sistema equilibrado com base no termo de referência (IFSC, 2009), podem ser verificados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de potências nos QGBTs referentes ao sistema equilibrado

	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
S (kVA)	53,28	53,28	53,28	36,60	36,60	36,60	92,06	92,06	92,06
P (kW)	50,89	50,89	50,89	36,17	36,17	36,17	89,82	89,82	89,82
FP	0,95	0,95	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Q _{indutivo} (kVAr)	16,21	16,21	16,21	19,84	19,84	19,84	49,89	49,89	49,89
	RST			RST			RST		
Q _{cap} (kVAr) ^a	-			30,73			70,22		
^a Potência reativa capacitiva trifásica necessária para correção do fator de deslocamento resultante das medições .									

Fonte: Elaboração própria (2019).

A quantidade de unidades capacitivas utilizadas nos QGBTs para corrigir o fator de deslocamento da planta elétrica consta na Tabela 8.

Tabela 8 – Unidades capacitivas para cada QGBT referente ao sistema equilibrado

QGBT	Unidades capacitivas de 45,90 uF	Unidades capacitivas de 91,84 uF	Potência reativa do banco de capacitores (kVAr) ^a
2	-	-	-
3	-	6	30,00
4	6	12	75,00

^a Potência reativa trifásica fornecida pelos bancos de capacitores conectados em delta.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Posteriormente, com os dados das medições fornecidos pela instituição, elaborou-se um modelo com uma estrutura trifásica com cargas monofásicas do tipo RL. Para determinação das cargas lineares dos QGBTs utilizaram-se as Equações (15) a (22), os resultados podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs

QGBT	Fase	Z ($m\Omega$)	R_l ($m\Omega$)	L_l (μH)	Ângulo ($^\circ$)
2	R	968,09	924,26	764,00	17,30
	S	968,09	924,26	764,00	17,30
	T	968,09	924,26	764,00	17,30
3	R	$1,27 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^3$	$1,83 \cdot 10^3$	8,78
	S	$1,27 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^3$	$1,83 \cdot 10^3$	8,78
	T	$1,27 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^3$	$1,83 \cdot 10^3$	8,78
4	R	499,93	420,16	718,64	10,04
	S	499,93	420,16	718,64	10,09
	T	499,93	420,16	718,64	10,09

Fonte: Elaboração própria (2019).

As correntes em frequências harmônicas obtidas nas medições foram modeladas por fontes de correntes conectadas em paralelo com a carga RL, sendo que para o sistema equilibrado as amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares foram determinadas mediante a média aritmética dos valores percentis de 95% de cada conjunto de dados medidos, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares para o sistema equilibrado

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
3 ^a	14,03	14,03	14,03	12,10	12,10	12,10	39,98	39,98	39,98
5 ^a	4,96	4,96	4,96	7,29	7,29	7,29	12,47	12,47	12,47
7 ^a	1,56	1,56	1,56	1,84	1,84	1,84	5,71	5,71	5,71
9 ^a	1,73	1,73	1,73	0,75	0,75	0,75	4,35	4,35	4,35
11 ^a	1,03	1,03	1,03	0,55	0,55	0,55	2,58	2,58	2,58
13 ^a	0,58	0,58	0,58	0,40	0,40	0,40	1,75	1,75	1,75
15 ^a	0,51	0,51	0,51	0,26	0,26	0,26	1,17	1,17	1,17

Fonte: Elaboração própria (2019).

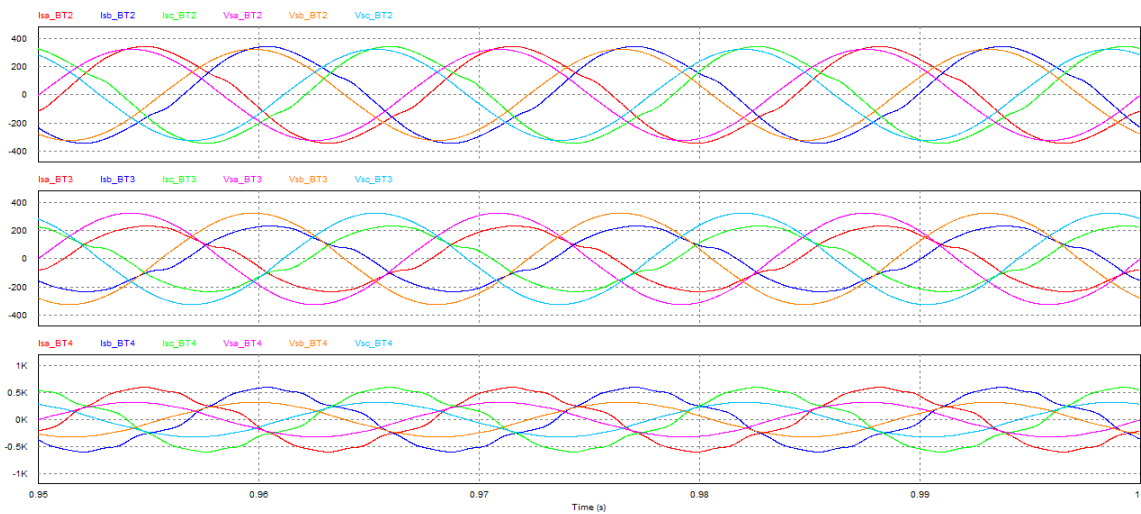
As correntes harmônicas da Tabela 10 apresentam defasagem de acordo com as Equações (2), (3) e (4), sendo os ângulos de cada componente harmônica de corrente correspondente aos ângulos de deslocamento entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, em suas respectivas fases dos QGBTs.

4.1.1.1 Validação do modelo proposto

Para validar o modelo proposto com carga linear e não linear realizou-se a simulação da planta elétrica modelada que consta no Apêndice A.

Através da simulação, observaram-se as componentes de tensão e corrente vistas pelos alimentadores, medidas pelo voltímetro (V_s) e amperímetro (I_s) dos respectivos QGBTs, apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos respectivos QGBTs



Fonte: Elaboração própria (2019).

A partir da simulação da planta elétrica, mediram-se os valores das grandezas referentes aos alimentadores, os valores medidos constam na Tabela 11.

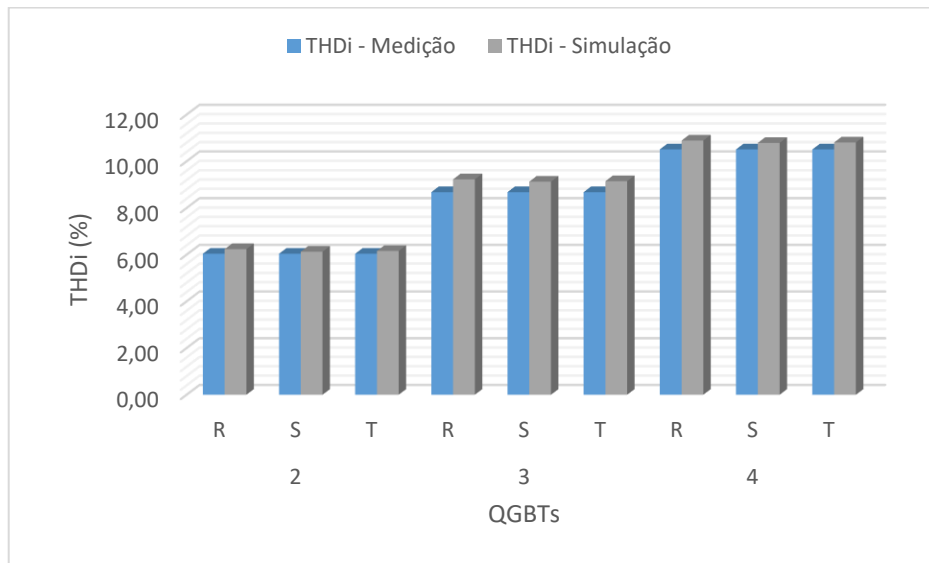
Tabela 11 – Medições dos valores das grandezas referentes a simulação do modelo proposto

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: Elaboração própria (2019).

Com os dados obtidos na simulação, verificou-se que a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase dos QGBTs apresenta uma diferença de, no máximo, 5,96% entre o modelo proposto e as medições no PCC, validando desta maneira o modelo, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - THDi para cada fase dos QGBTs obtidas através de medição e de simulação do modelo

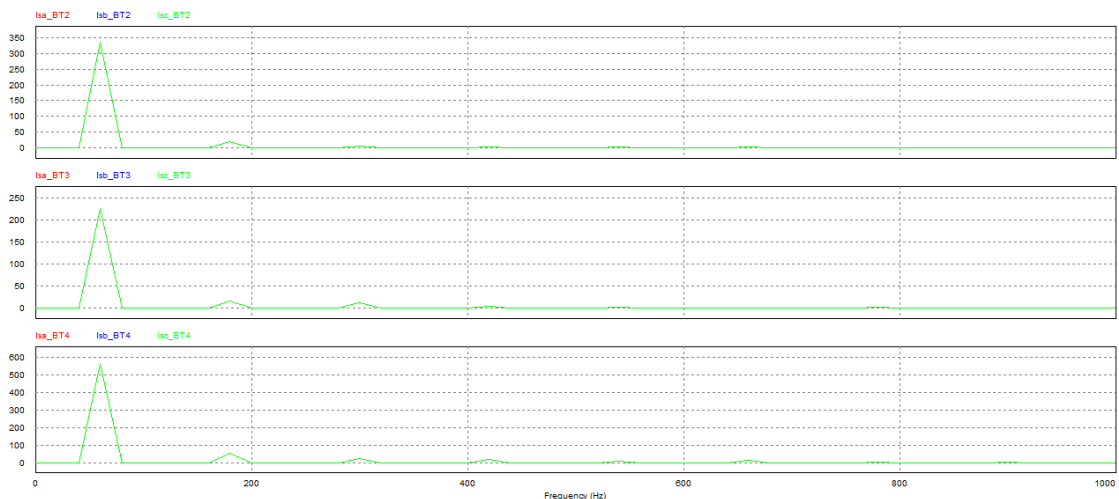


Fonte: Elaboração Própria (2019).

4.1.1.1.1 Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs

Para avaliar as amplitudes das componentes harmônicas do modelo proposto, recorreu-se ao espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, como apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após examinar a FFT, efetuaram-se as medições dos valores referentes às componentes harmônicas da corrente em cada fase dos QGBTs, onde observou-se que a 3ª e 5ª harmônica apresentam valores significativos, de acordo com a Tabela 12.

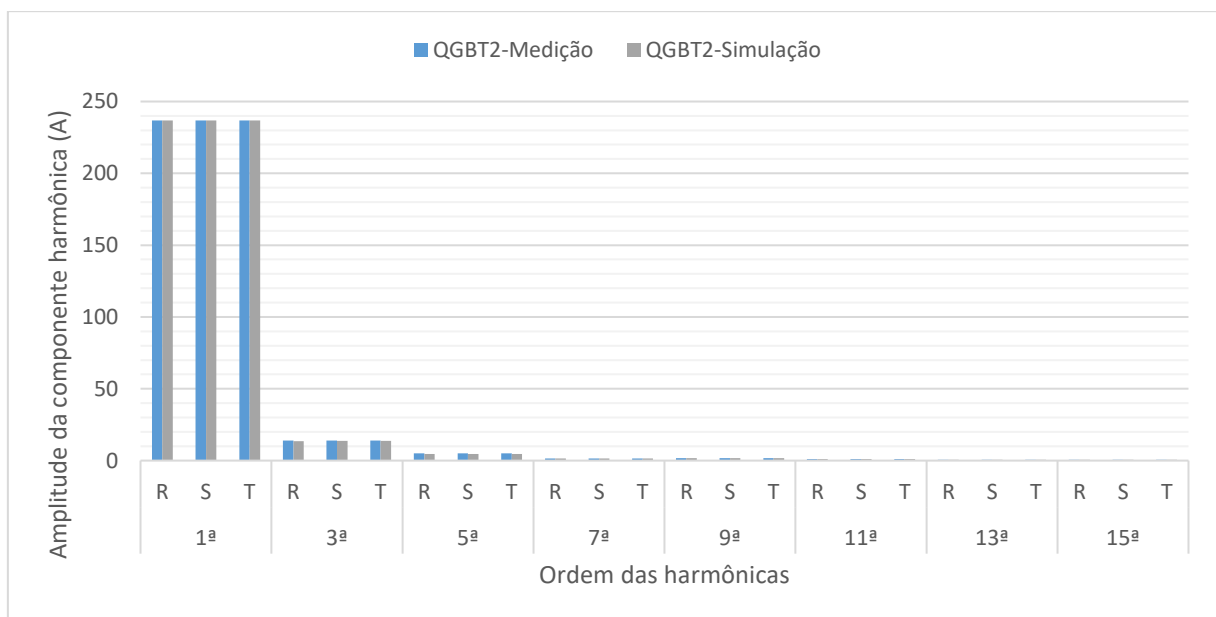
Tabela 12 – Amplitudes das correntes harmônicas obtidas por meio de simulação

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: Elaboração própria (2019).

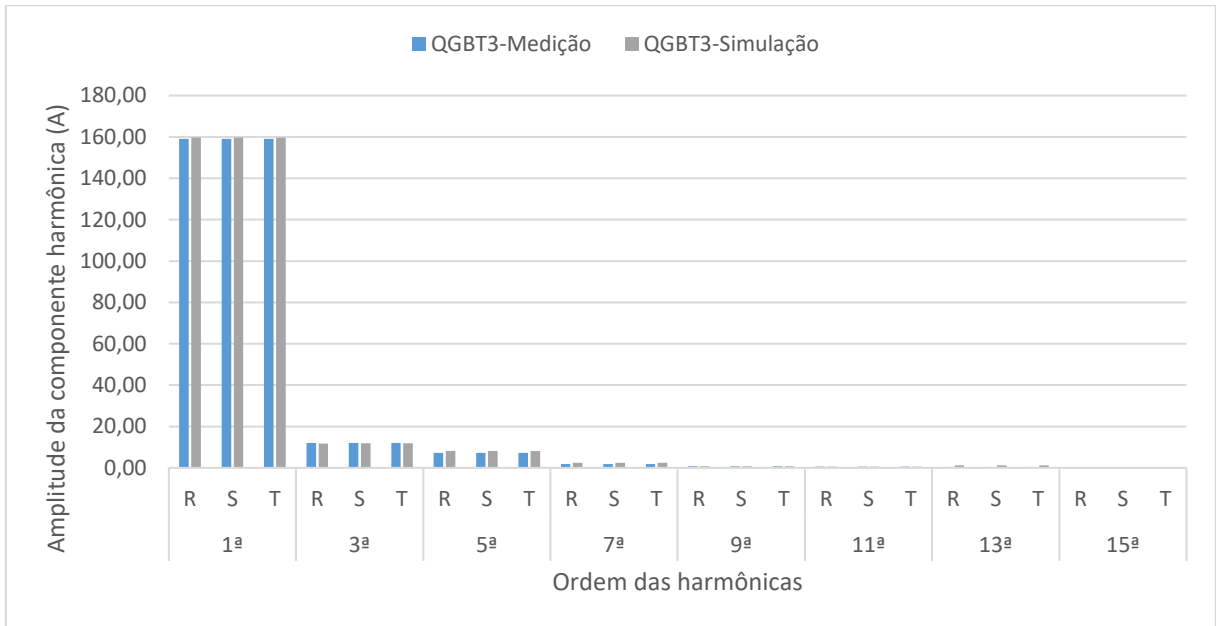
Em seguida, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas obtidas por meio da simulação e das medições no PCC, conforme mostra a Figura 17, Figura 18 e Figura 19.

Figura 17 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-2 obtidas através de medição e simulação



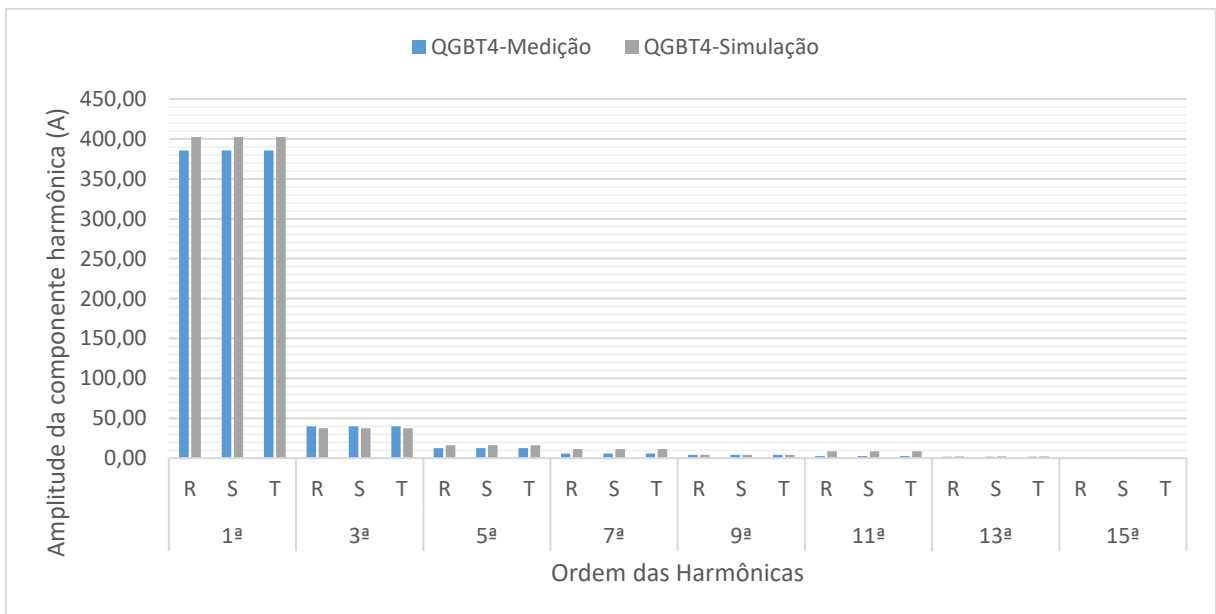
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 18 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-3 obtidas através de medição e simulação



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 19 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-4 obtidas através de medição e simulação



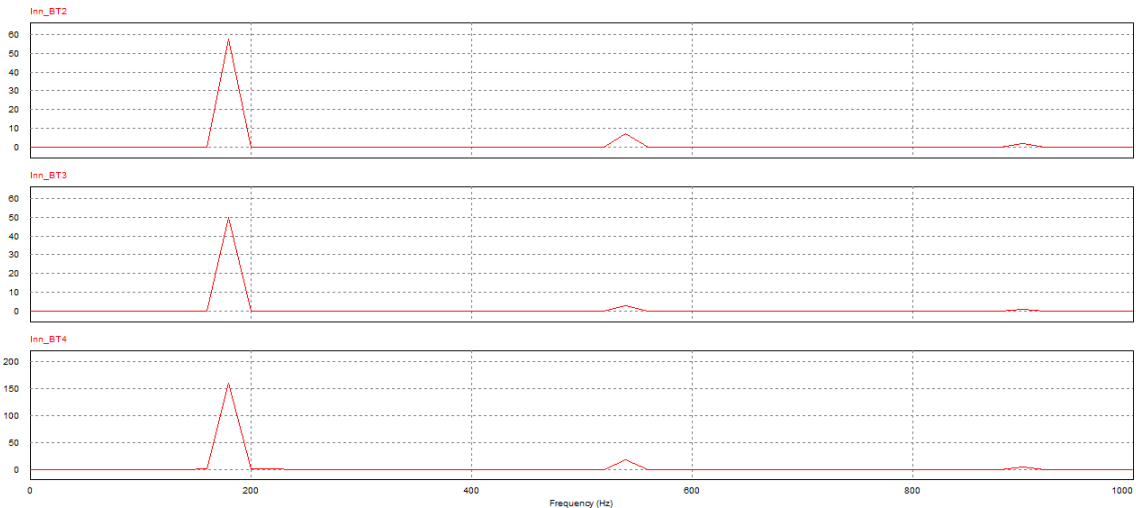
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Analisando a amplitude das correntes harmônicas em cada fase dos QGBTs, notou-se um aumento elevado na componente harmônica de 11ª ordem no QGBT-4, devido a ressonância entre o banco de capacitores estimado e a impedância da fonte.

4.1.1.1.2 Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs

Para analisar a corrente no condutor de neutro dos respectivos QGBTs, obteve-se o espectro harmônico, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Espectro harmônico da corrente no condutor de neutro dos respectivos QGBTs



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Em seguida foram realizadas as medições das componentes harmônicas presentes no condutor de neutro de cada QGBT, Tabela 13, onde se constatou que a corrente dos respectivos condutores têm forte influência da componente harmônica de 3^a ordem.

Tabela 13 – Amplitudes das correntes harmônicas no condutor de neutro dos QGBTs

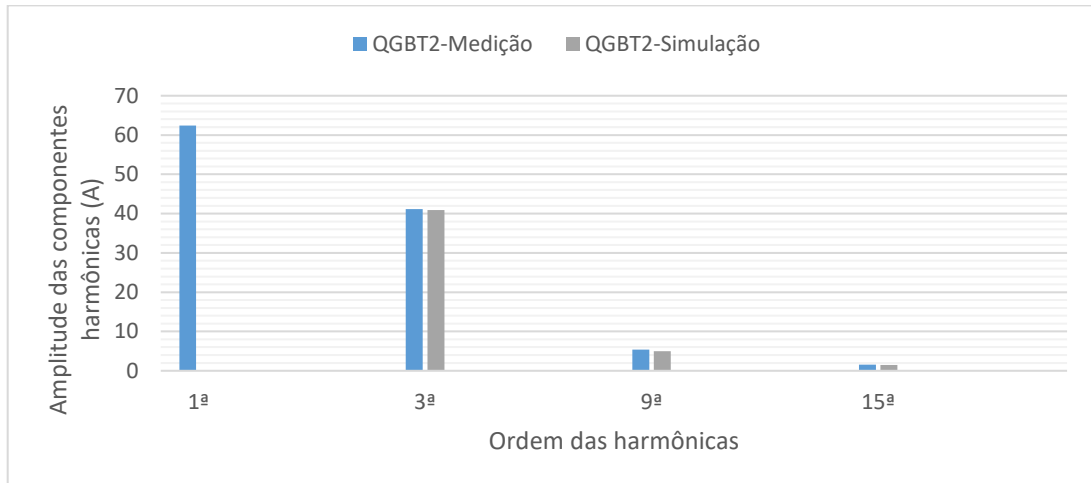
Componente harmônica de corrente (A)	QGBT					
	2		3		4	
	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b
1 ^a	62,40	0,00	53,53	0,00	158,04	0,00
3 ^a	41,11	40,90	36,03	35,43	115,78	112,88
9 ^a	5,42	4,95	2,54	2,19	13,46	12,16
15 ^a	1,58	1,45	1,09	0,76	3,34	3,26

^a Valores das medições do sistema real;
^b Valores das simulações do sistema equilibrado.

Fonte: Elaboração própria (2019).

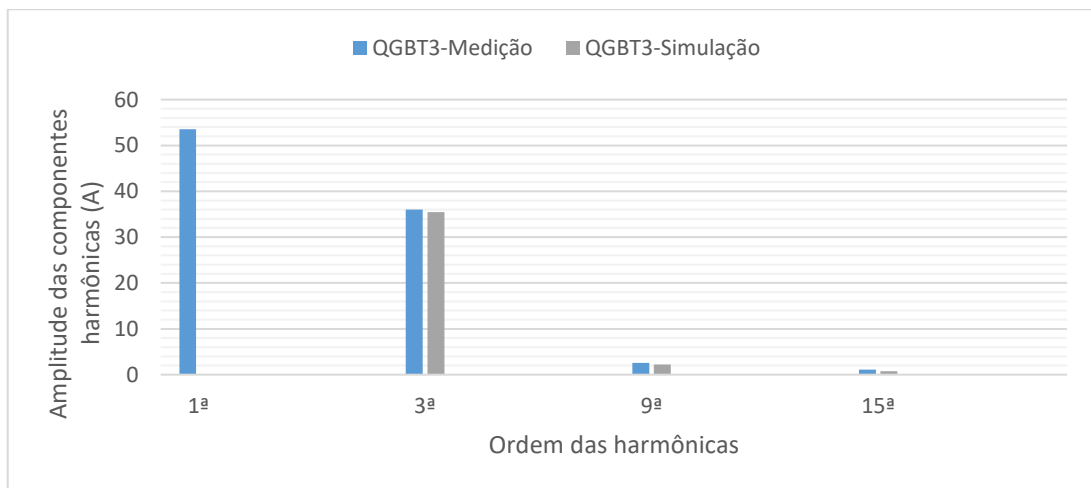
Após a simulação, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas no condutor de neutro de cada QGBT, obtidas por meio da simulação do modelo proposto e das medições no PCC, conforme mostra a Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

Figura 21 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-2



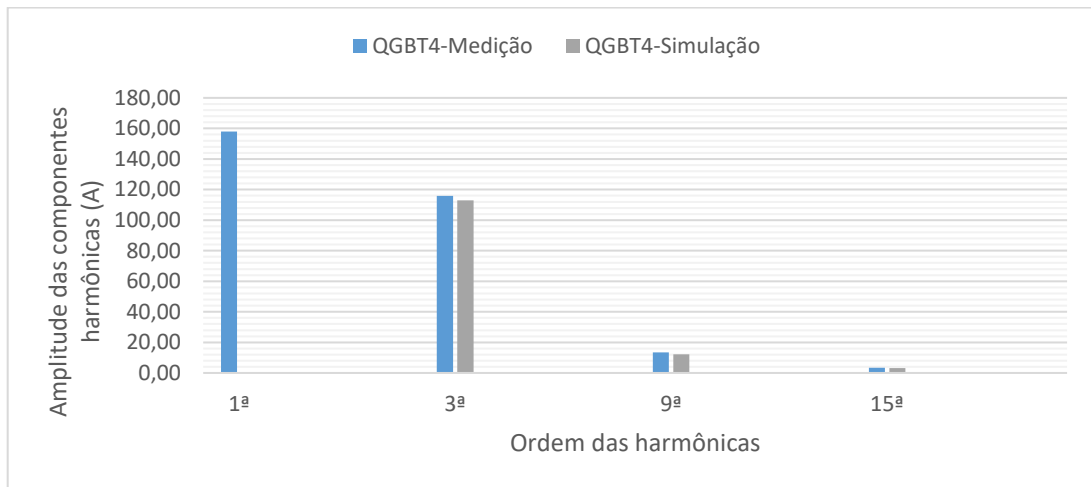
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 22 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-3



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 23 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-4



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio da análise realizada, verificou-se que a corrente do condutor de neutro de cada QGBT está relacionada com a presença de harmônicos homopolares, com maior influência da componente de terceira harmônica. Além disso, por se tratar de um sistema equilibrado, os condutores de neutro não apresentam componentes harmônicas na frequência fundamental e nas frequências não-*triplens*, que são provocadas pelo desequilíbrio entre as correntes de fase.

As componentes das harmônicas de 3ª ordem e múltiplas ímpares de três (harmônicas *triplens*) possuem fase zero, isto é, as respectivas correntes das harmônicas são somadas algebricamente no neutro, resultando em um aumento significativo do seu valor. Logo, circulará no neutro as correntes das harmônicas *triplens*, mantendo o sistema equilibrado.

O valor eficaz total da corrente no condutor de neutro ($I_{nn,ef}$) em cada QGBT, consta na Tabela 14.

Tabela 14 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, referente a simulação do modelo proposto

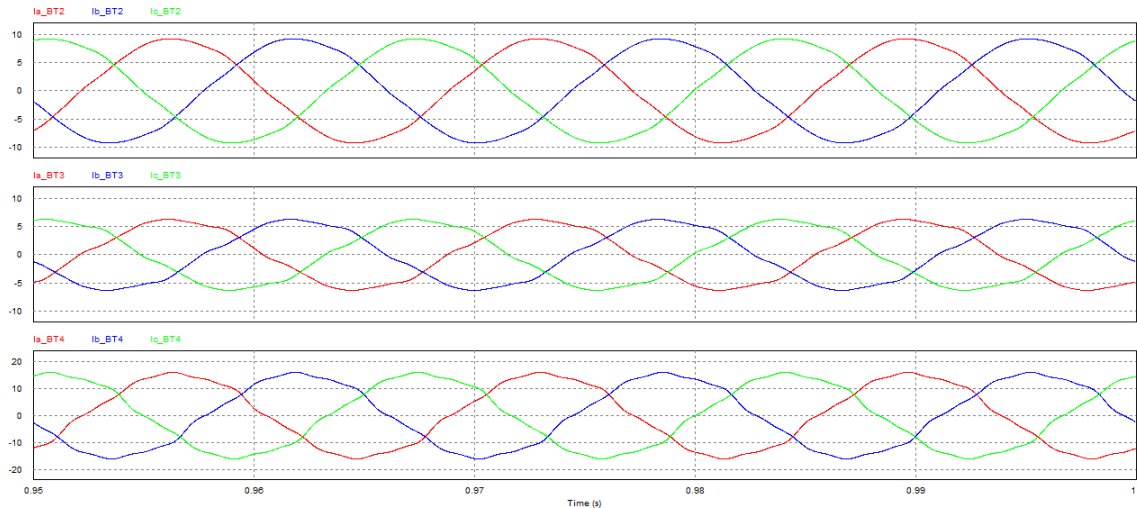
QGBT	$I_{nn,ef}$ (A)
2	41,22
3	35,51
4	113,58

Fonte: Elaboração própria (2019).

4.1.1.1.3 Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores

Através da simulação, observaram-se as correntes de linha vistas a montante dos transformadores, Figura 24.

Figura 24 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Posteriormente, obtiveram-se os valores da THD_i referente a cada fase dos transformadores, como apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – THD_i vistas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs

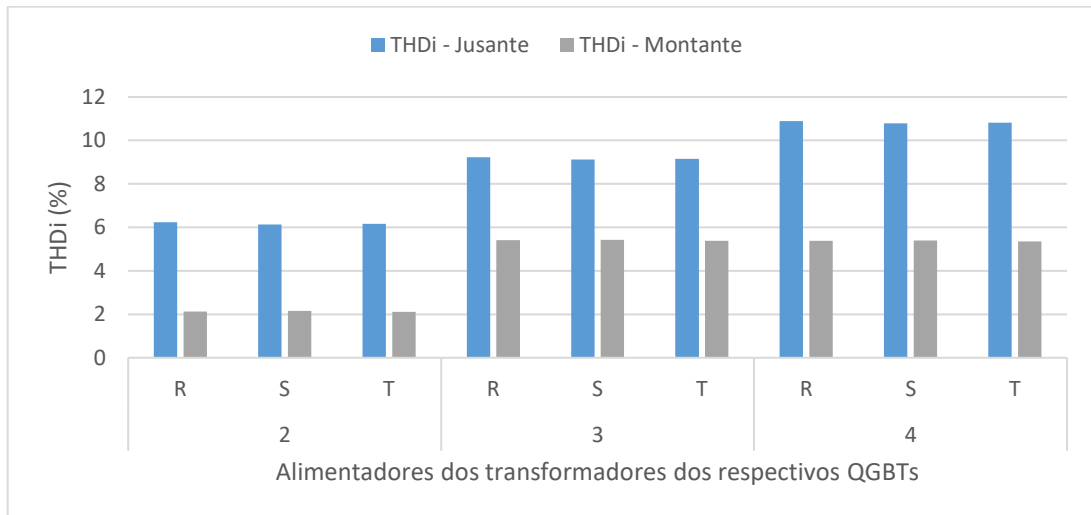
QGBT	Fase	THD_i (%)
2	R	2,13
	S	2,15
	T	2,11
3	R	5,41
	S	5,43
	T	5,38
4	R	5,38
	S	5,39
	T	5,36

Fonte: Elaboração própria (2019).

Analisando os dados, notou-se que a distorção harmônica da corrente a montante dos transformadores é inferior aos valores medidos a jusante, Figura 25,

sendo que os valores a jusante dos transformadores correspondem aos valores simulados a montante dos QGBTs.

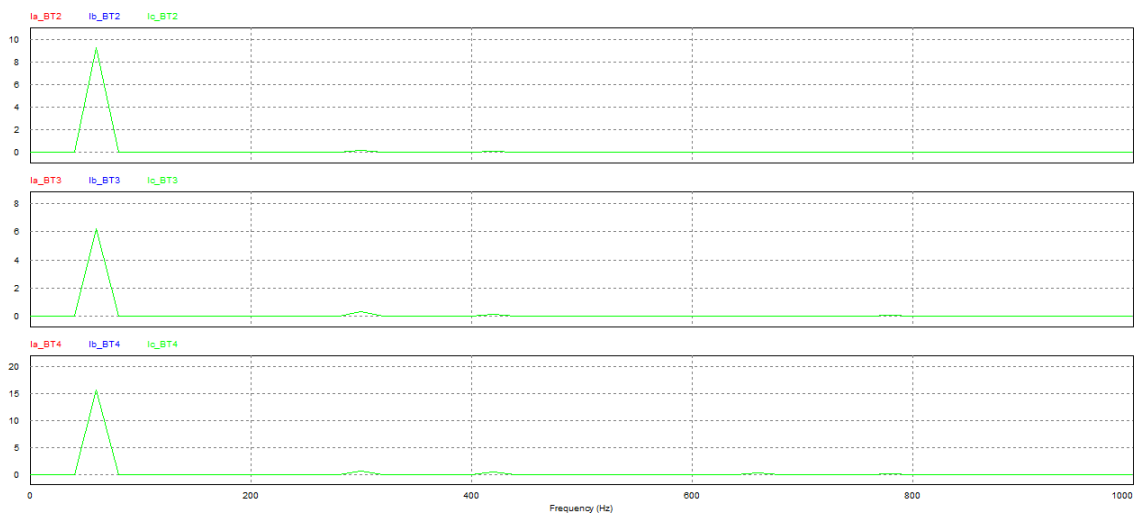
Figura 25 – Medição da THD_i para cada fase a montante e a jusante dos transformadores responsáveis pela alimentação dos QGBTs



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Com o intuito de analisar a redução da THD_i a montante dos transformadores, obtiveram-se os espectros harmônicos das correntes de linha, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Espectros harmônicos das correntes a montante dos transformadores



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio da FFT, mediram-se as amplitudes das componentes harmônicas da corrente em cada fase, Tabela 16.

Tabela 16 – Amplitudes das correntes harmônicas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs, obtidas por meio de simulação

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

Fonte: Elaboração própria (2019).

Desta maneira, constatou-se que a redução da THD_i está relacionada com o “aprisionamento” das correntes harmônicas de 3^a ordem e as múltiplas ímpares de três no delta dos transformadores, uma vez que as harmônicas homopolares estão em fase entre si.

4.1.1.1.4 Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014

Para avaliar os níveis harmônicos de corrente na planta elétrica modelada utilizou-se a recomendação da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), sendo o PCC a entrada de alimentação de cada QGBT.

Conforme a Tabela 1, os limites para sistemas com tensão de 120 V a 69 kV dependem do parâmetro I_{sc}/I_L , sendo I_{sc} a corrente de curto-circuito calculada de acordo com as Equações (10), (11) e (12).

Os resultados dos cálculos das correntes de curto-circuito nos QGBTs e as grandezas necessárias para calcular a faixa I_{sc}/I_L constam na Tabela 17, sendo o valor da corrente máxima demandada pela carga na componente de frequência fundamental (I_L) igual ao valor da corrente medida no alimentador (I_{sef}).

Tabela 17 – Valores das grandezas necessárias para determinar o parâmetro I_{sc}/I_L

QGBT	Z_B (m Ω)	Z_{pu} (%)	Z_{trafo} (m Ω)	I_{sc} (kA)	I_L (A)	I_{sc}/I_L
2	288,80	5,83	16,84	13,06	237,23	55,05
					237,22	55,05
					237,19	55,06
3	288,80	7,30	21,08	10,44	160,32	65,12
					160,31	65,12
					160,29	65,13
4	288,80	7,30	21,08	10,44	404,89	25,78
					404,87	25,79
					404,83	25,79

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os dados medidos na simulação, calculou-se para cada fase dos QGBTs o maior valor percentil medido entre harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD

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: Elaboração própria (2019).

Com base na Tabela 17, os níveis de distorção harmônica da corrente no QGBT-2 e QGBT-3 devem ser avaliados para o parâmetro I_{sc}/I_L entre 50 e 100, no entanto no caso do QGBT-4 os limites estão associados a faixa I_{sc}/I_L entre 20 e 50.

Portanto, analisando a Tabela 18 constatou que o QGBT-2 e QGBT-3 respeitam os limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), em

contrapartida o QGBT-4 excede os valores sugeridos, visto que o limite de 8% da TDD é extrapolado nas três fases, da mesma maneira que o limite de 7% para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre 3 e 11.

Assim sendo, percebeu-se que a componente harmônica de 3ª ordem tem predominância nos resultados de distorção harmônica da corrente no QGBT-4, evidenciando a presença significativa de cargas não lineares monofásicas, característica de unidades comerciais.

4.1.1.2 Projeto do filtro shunt 3C1L

O projeto do filtro passivo foi realizado para o transformador trifásico a seco de 500 kVA (380/220 V) correspondente ao QGBT-4, para “aprisionar” a componente de terceira harmônica, e conseqüentemente reduzir a sobrecarga no neutro e da instalação. Os valores correspondentes as medições da atual carga instalada, são evidenciados na Tabela 19.

Tabela 19 – Dados tratados das medições no QGBT-4

QGBT	Fase	V_{ef} (V)	I_{ef} (A)	FP	THD_i (%)	S (kVA)	P (kW)
4	R	227,14	405,31	0,98	10,51	92,06	89,82
	S	227,14	405,31	0,98	10,51	92,06	89,82
	T	227,14	405,31	0,98	10,51	92,06	89,82

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para o dimensionamento da unidade de filtragem, utilizou-se a potência reativa capacitiva por fase responsável pela correção do fator de deslocamento do respectivo quadro geral de baixa tensão, QGBT-4. Isto é, aumentou-se a quantidade de unidades capacitivas devido a conexão em estrela do respectivo filtro com topologia 3C1L.

Além disso, a quantidade de unidades capacitivas levou em consideração a potência reativa disponibilizada pelo capacitor comercial, quando conectado a tensão de fase de 227,14 V, conforme a Equação (34).

$$Q_{cap}^{(U_{n,rede})} = Q_{cap}^{(U_{n,cap})} \cdot \left(\frac{U_{n,rede}}{U_{n,cap}} \right)^2 \quad (34)$$

Onde:

$Q_{cap}^{(U_{n,rede})}$ = Potência reativa da unidade capacitiva corrigida para tensão da rede

$Q_{cap}^{(U_{n,cap})}$ = Potência reativa comercial da unidade capacitiva

$U_{n,rede}$ = Valor da tensão da rede

$U_{n,cap}$ = Valor da tensão nominal da unidade capacitiva

A quantidade de unidades capacitivas utilizadas, é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 – Unidades capacitivas para cada fase do QGBT-4 referente ao sistema equilibrado

QGBT	Fase	Unidades capacitivas		Potência reativa do banco de capacitores (kVAr)	
		45,90 uF ^a	91,84 uF ^b	Comercial	Corrigida ^c
4	R	1	22	112,50	40,20
	S	1	22	112,50	40,20
	T	1	22	112,50	40,20

^a Unidades capacitivas de 2,5 kVAr e 380 V
^b Unidades capacitivas de 5,0 kVAr e 380 V
^c Potência reativa das unidades capacitivas corrigidas para tensão da rede

Fonte: Elaboração própria (2019).

Dessa maneira, o valor de capacitância, C_{sh} , do banco de capacitores do filtro *shunt* representa a quantidade de unidade capacitiva atual da instalação elétrica, utilizada para correção do fator de deslocamento.

Uma vez estabelecida a capacitância por fase, C_{sh} , dimensionou-se o reator monofásico, L_{sh1} , para que o mesmo sintonize o filtro *shunt* na frequência da componente harmônica de terceira ordem, por meio das Equações (23) e (24).

$$L_{sh1} = 126,11 \mu H$$

A resistência do filtro *shunt* na configuração 3C1L, R_{sh1} foi estabelecida por meio da Equação (26), para um fator de qualidade igual a 100.

$$R_{sh1} = 1,43 \text{ m}\Omega$$

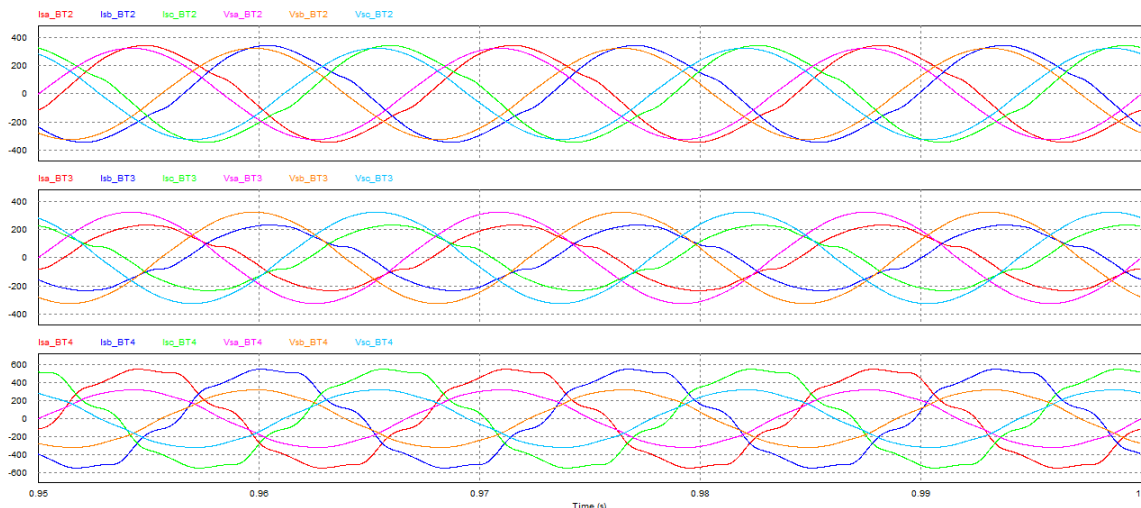
Portanto, com os dados obtidos no dimensionamento do banco capacitivo e do reator monofásico, projetou-se através do *software* de CAD 3D (SOLIDWORKS,2017) o painel elétrico necessário para abrigar o filtro *shunt* 3C1L, como apresentado no Apêndice E. Verificando que o projeto físico do respectivo filtro não acarreta em um impacto significativo em termo de espaço na subestação abrigada do IFSC – Câmpus Florianópolis.

4.1.1.2.1 Análise da THD_i nos QGBTs

Para avaliar a THD_i após a inserção do filtro *shunt* 3C1L, realizou-se a simulação da planta elétrica modelada no Apêndice B.

O comportamento das componentes de tensão e corrente vistas pelos alimentadores, medidas pelo voltímetro (Vs) e amperímetro (Is) dos respectivos QGBTs, são apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Tensão e corrente vistas pelos alimentadores de cada QGBT com o filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração própria (2019).

A partir da simulação da planta elétrica, obtiveram-se os valores das grandezas referentes aos alimentadores, os valores medidos constam na Tabela 21.

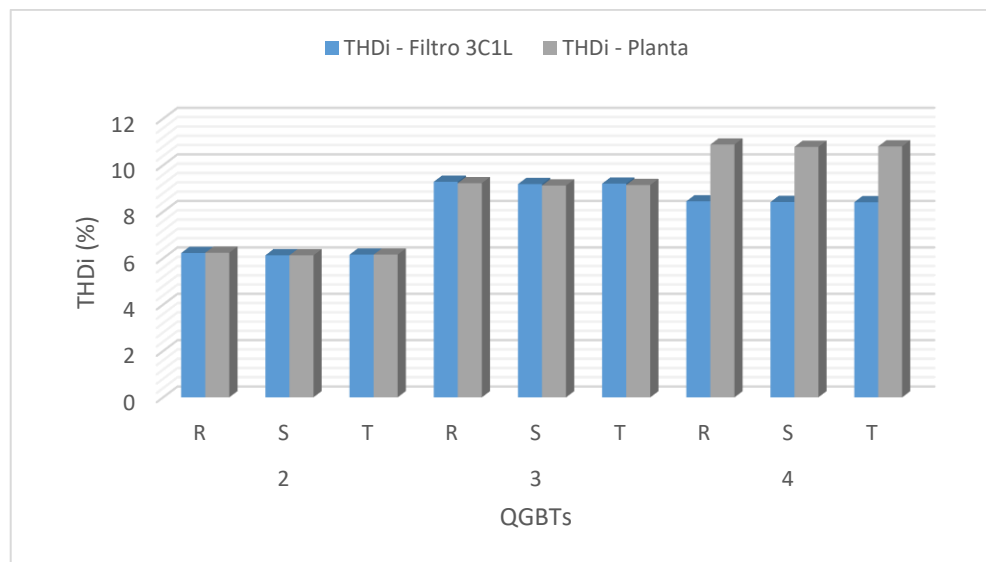
Tabela 21 – Valores das grandezas referentes aos alimentadores após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

QGBT	Fase	FP	THD_i (%)	V_{sef} (V)	I_{sef} (A)
2	R	0,95	6,23	229,33	237,32
	S	0,95	6,13	229,29	237,31
	T	0,95	6,16	229,29	237,28
3	R	0,95	9,29	229,76	160,39
	S	0,95	9,19	229,73	160,38
	T	0,95	9,21	229,72	160,37
4	R	0,98	8,45	228,33	391,39
	S	0,98	8,42	228,29	391,35
	T	0,98	8,41	228,29	391,32

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os dados obtidos após a conexão do filtro *shunt* 3C1L, verificou-se que a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase do QGBT-4 apresenta uma redução de aproximadamente 22% em relação a planta elétrica modelada, como pode ser verificado na Figura 28.

Figura 28 - THD_i para cada fase dos QGBTs obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

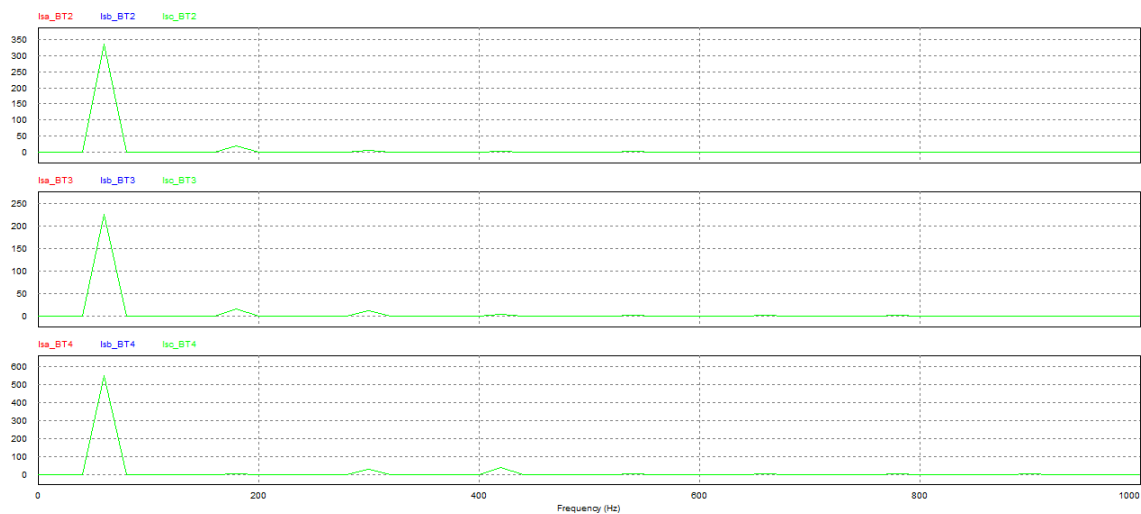
Além disso, na Figura 28 observou-se que o caminho de baixa impedância criado pelo filtro *shunt* 3C1L no QGBT-4 não afetou a THD_i nos demais QGBTs, uma

vez que apresentam uma diferença de no máximo de 0,66%, quando comparados com os valores da planta elétrica modelada.

4.1.1.2.2 Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs

Para avaliar a eficiência do filtro *shunt*, obteve-se o espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, como apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após examinar a FFT, efetuaram-se as medições dos valores referentes às componentes harmônicas da corrente em cada fase, como expõe a Tabela 22, podendo analisar a eficiência do filtro e a influência do caminho de baixa impedância na planta elétrica.

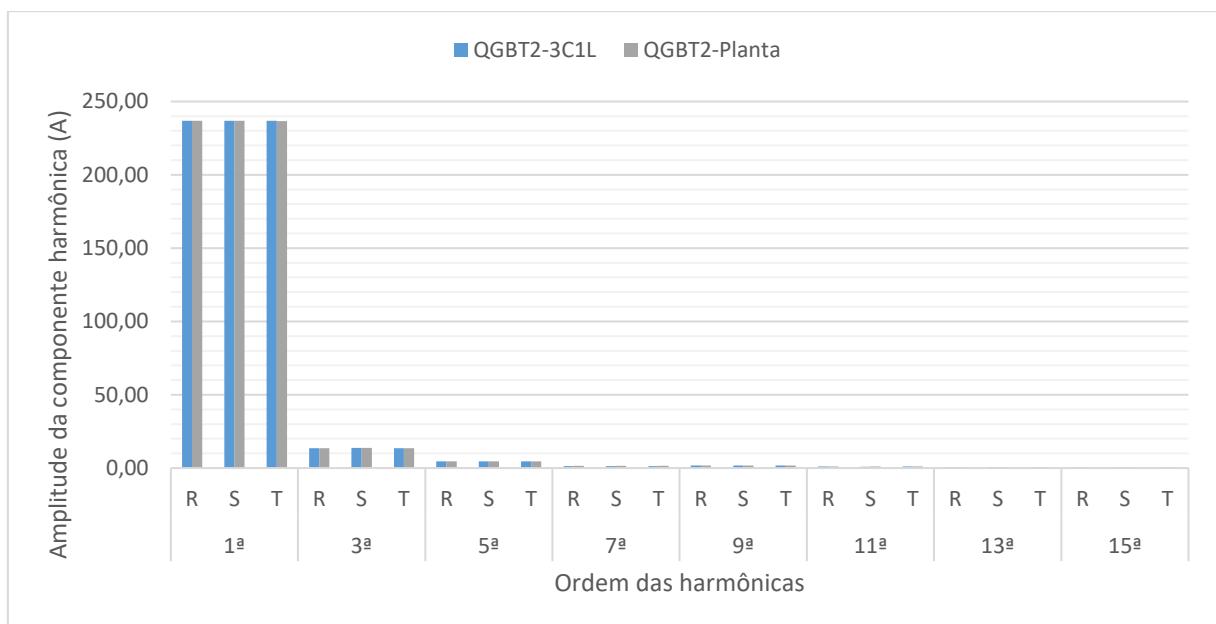
Tabela 22 – Amplitudes das correntes harmônicas obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1 ^a	236,87	236,85	236,83	159,72	159,70	159,69	390,02	389,98	389,95
3 ^a	13,60	13,66	13,64	11,79	11,83	11,82	2,72	2,74	2,76
5 ^a	4,62	4,62	4,63	8,12	8,13	8,14	19,84	19,88	19,90
7 ^a	1,34	1,34	1,34	2,75	2,74	2,74	25,50	25,49	25,49
9 ^a	1,64	1,65	1,65	0,73	0,74	0,73	3,53	3,51	3,51
11 ^a	0,98	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00	2,81	2,82	2,81
13 ^a	0,54	0,54	0,54	1,47	1,47	1,47	1,17	1,16	1,16
15 ^a	0,48	0,49	0,48	0,25	0,25	0,25	0,95	0,95	0,95

Fonte: Elaboração própria (2019).

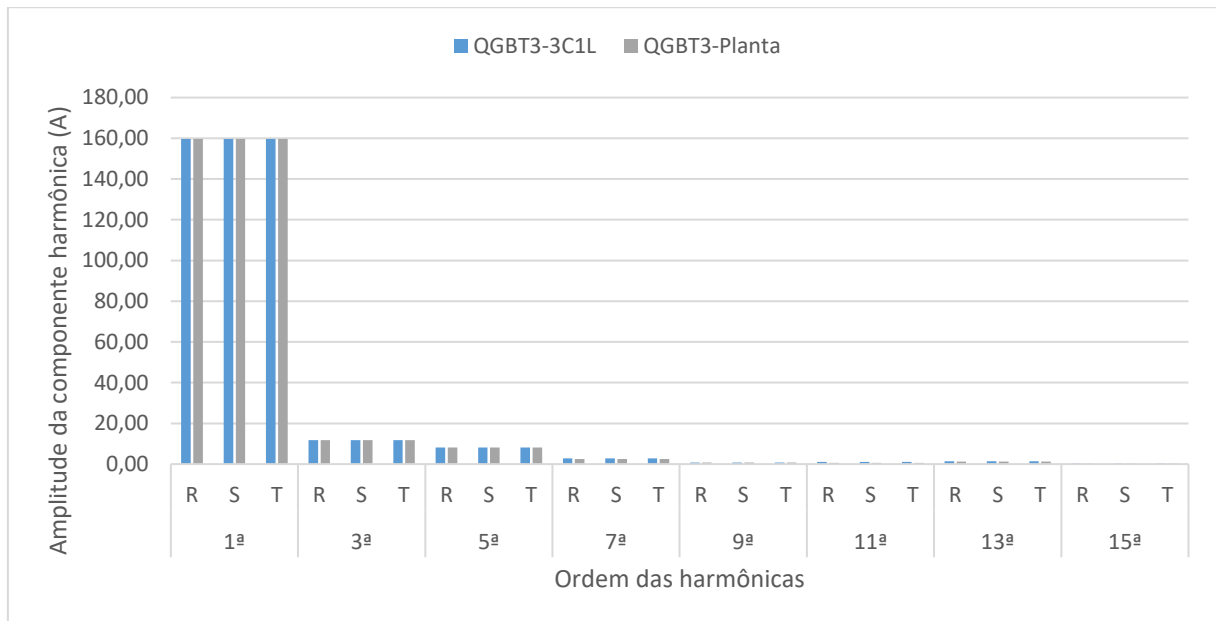
Após a simulação, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs entre a planta modelada e a planta elétrica com a inserção do filtro *shunt* 3C1L, conforme mostra a Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

Figura 30 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-2 obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



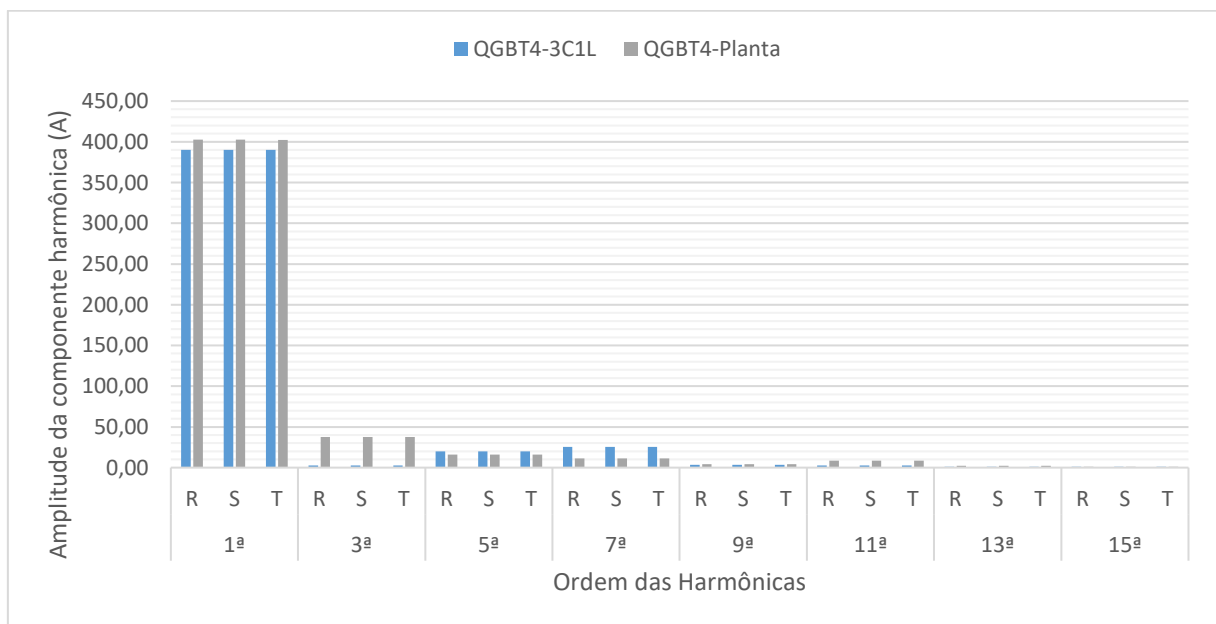
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 31 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-3 obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 32 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-4 obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio dos dados obtidos, verificou-se que a inserção do filtro *shunt* 3C1L não influenciou as componentes harmônicas de corrente nos QGBT-2 e QGBT-3, conforme nota-se na Figura 30 e Figura 31, respectivamente.

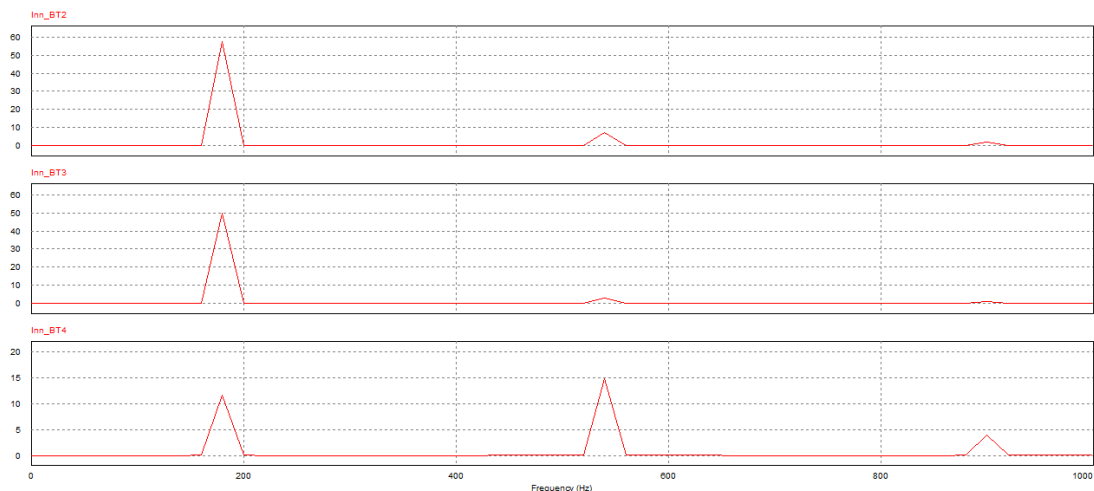
No entanto, notou-se na Figura 32 que o QGBT-4 apresenta uma eficiência de aproximadamente 93% na redução da componente harmônica de 3ª ordem, os resquícios da componente harmônica estão relacionados com o fator de qualidade do reator monofásico.

Além disso, a conexão do filtro *shunt* 3C1L no QGBT-4 corrigiu o problema de ressonância entre o banco de capacitores e a fonte, reduzindo a amplitude da componente harmônica de 11ª ordem. No entanto, aumentou de maneira significativa a componente harmônica de 7ª ordem.

4.1.1.2.3 Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs

Com intuito de avaliar a influência do filtro *shunt* 3C1L na corrente do condutor de neutro dos QGBTs, observaram-se seus respectivos espectros harmônicos, como mostra a Figura 33.

Figura 33 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após analisar a FFT, efetuaram-se as medições dos valores referentes às amplitudes das harmônicas *triplens* no condutor de neutro dos QGBTs, presentes na Tabela 23.

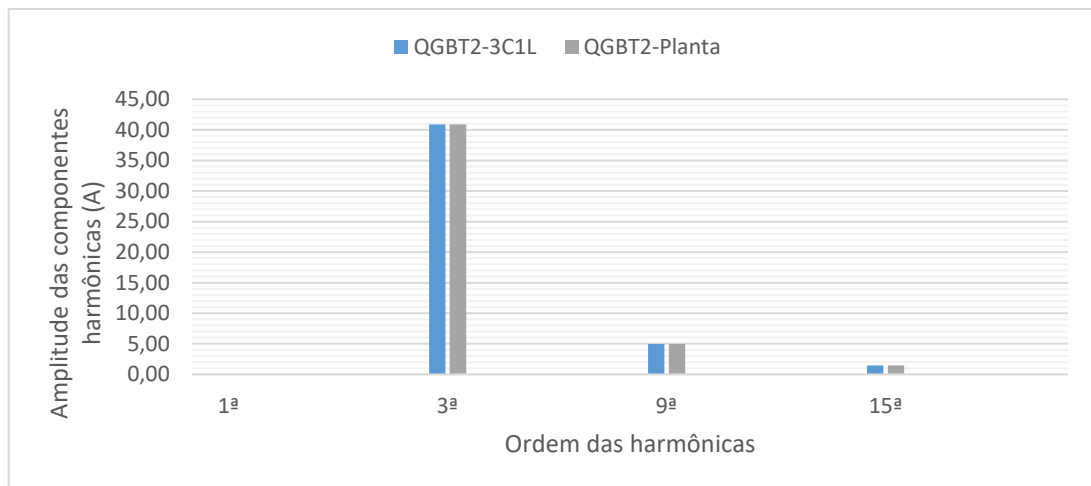
Tabela 23 – Amplitudes das correntes harmônicas no neutro dos QGBTs

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT					
	2		3		4	
	3C1L	Planta	3C1L	Planta	3C1L	Planta
1ª	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3ª	40,90	40,90	35,43	35,43	8,21	112,88
9ª	4,95	4,95	2,19	2,19	10,54	12,16
15ª	1,45	1,45	0,76	0,76	2,86	3,26

Fonte: Elaboração própria (2019).

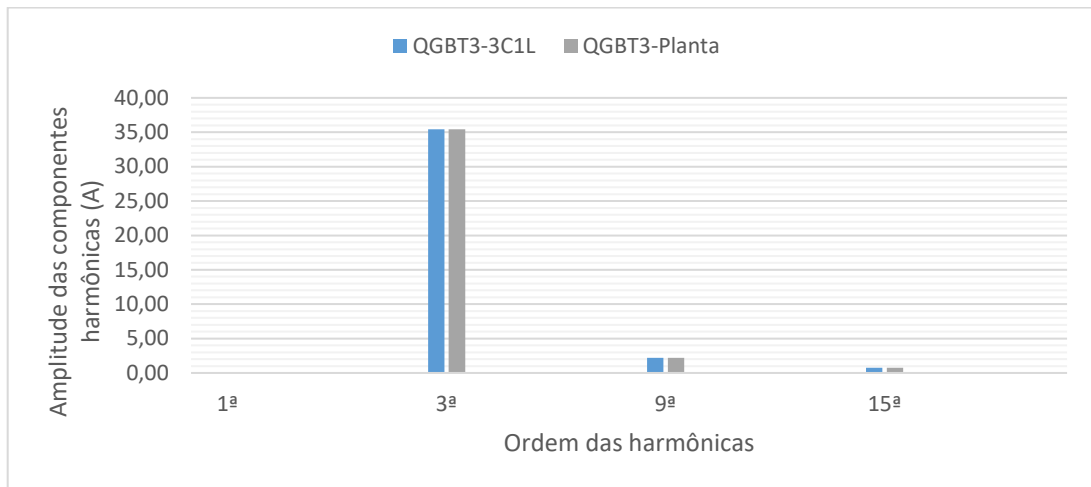
Depois da simulação, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas no condutor de neutro de cada QGBT, obtidas por meio da modelagem inicial e posteriormente com a inserção do filtro *shunt* 3C1L, de acordo com a Figura 34, Figura 35 e Figura 36.

Figura 34 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-2 com filtro 3C1L



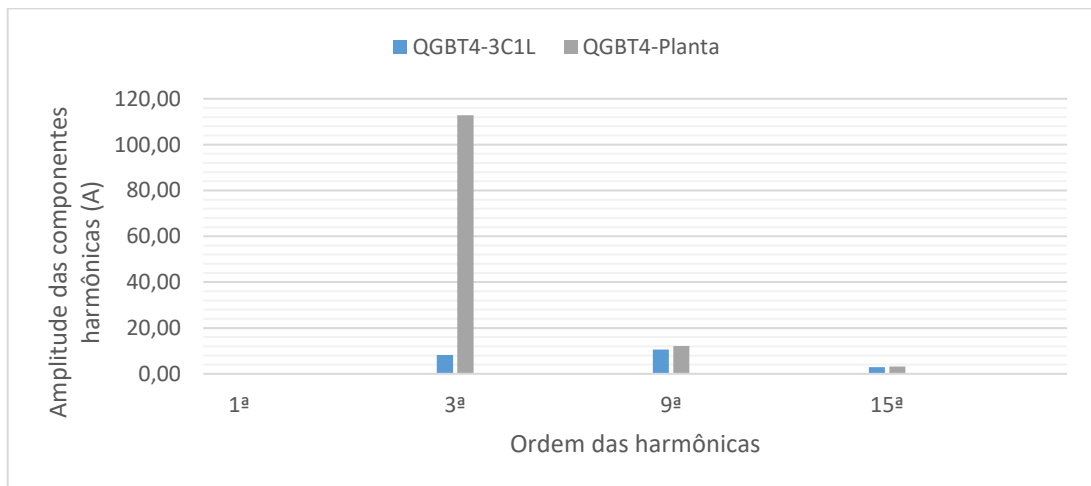
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 35 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-3 com filtro 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 36 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-4 com filtro 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio das medições das componentes harmônicas presentes no neutro de cada QGBT notou-se que a presença do filtro *shunt* 3C1L não afeta as harmônicas de sequência zero no neutro do QGBT-2 e QGBT-3. No entanto, percebeu-se uma redução da componente harmônica de 3ª ordem no QGBT-4 em aproximadamente 93%.

O valor eficaz total da corrente no condutor de neutro ($I_{nn,ef}$) em cada QGBT após a inserção do filtro *shunt* 3C1L, consta na Tabela 24.

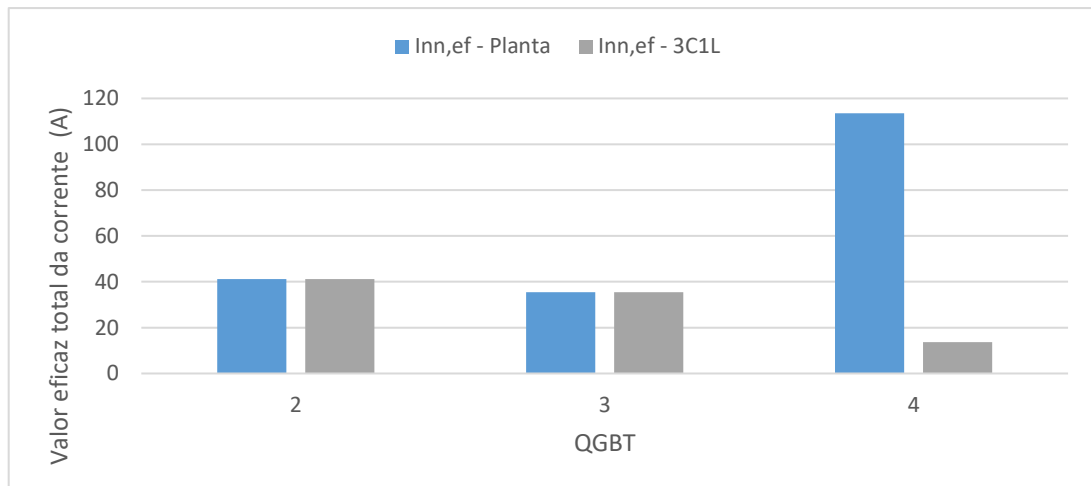
Tabela 24 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

QGBT	Inn,ef (A)
2	41,22
3	35,51
4	13,67

Fonte: Elaboração própria (2019).

Por último, comparou-se o valor eficaz total no condutor de neutro em cada QGBT, obtidas por meio da modelagem inicial e posteriormente com a inserção do filtro *shunt* 3C1L, de acordo com a Figura 37.

Figura 37 – Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro no sistema equilibrado

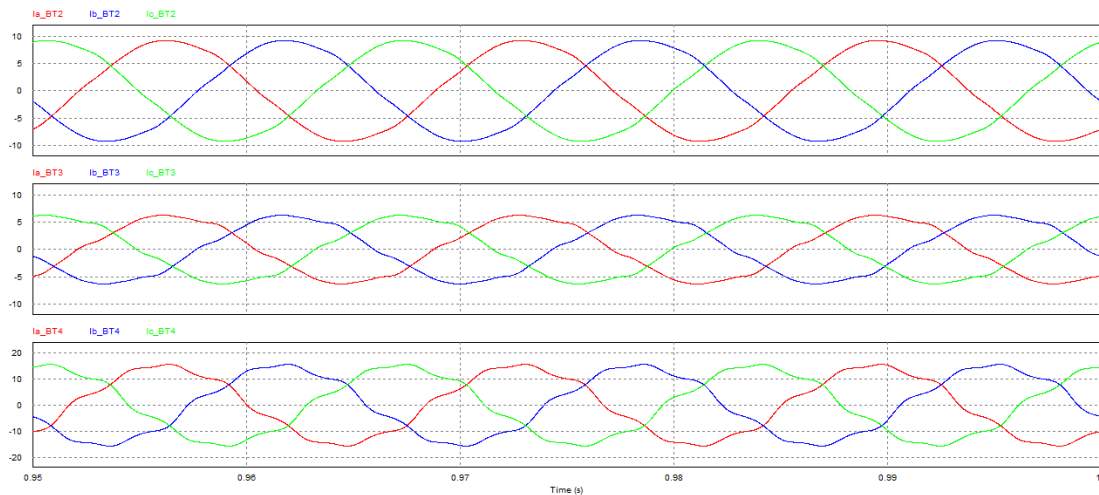


Fonte: Elaboração Própria (2019).

4.1.1.2.4 Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores

Através da simulação, verificou-se o comportamento das correntes de linha, vistas a montante dos transformadores, conforme mostra a Figura 38.

Figura 38 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Em seguida, obtiveram-se os valores da THD_i referente a cada fase dos transformadores, Tabela 25.

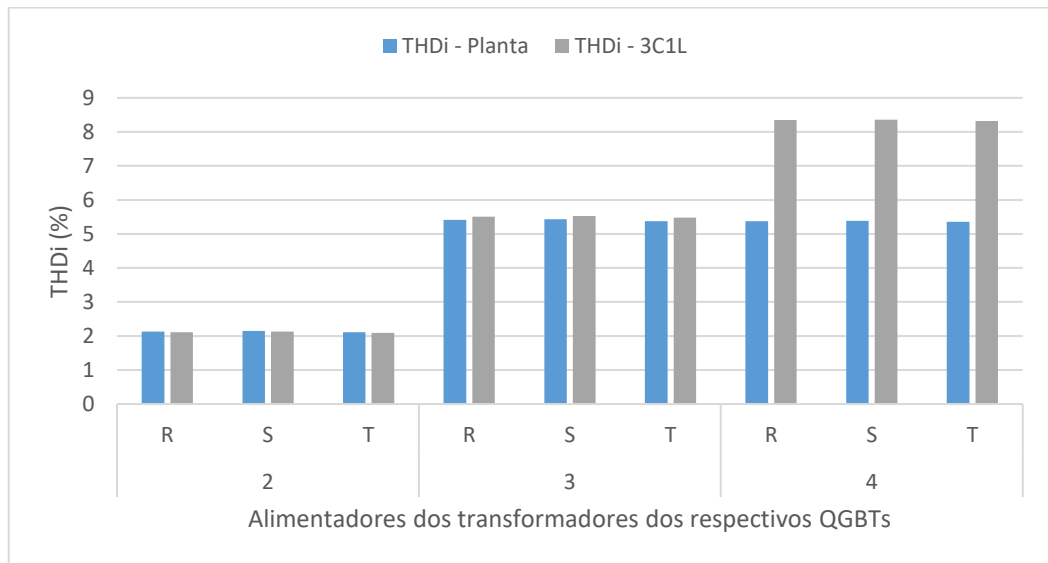
Tabela 25 – THD_i vistas a montante dos transformadores dos QGBTs obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

QGBT	Fase	THD_i (%) Modelagem inicial	THD_i (%) Filtro <i>shunt</i> 3C1L
2	R	2,13	2,11
	S	2,15	2,13
	T	2,11	2,09
3	R	5,41	5,51
	S	5,43	5,53
	T	5,38	5,48
4	R	5,38	8,35
	S	5,39	8,36
	T	5,36	8,32

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com intuito de avaliar o impacto na THD_i a montante dos transformadores logo após a inserção do filtro *shunt* 3C1L, confrontaram-se os valores das THD_i s obtidas na modelagem inicial e os valores depois da conexão do filtro, como mostra a Figura 39.

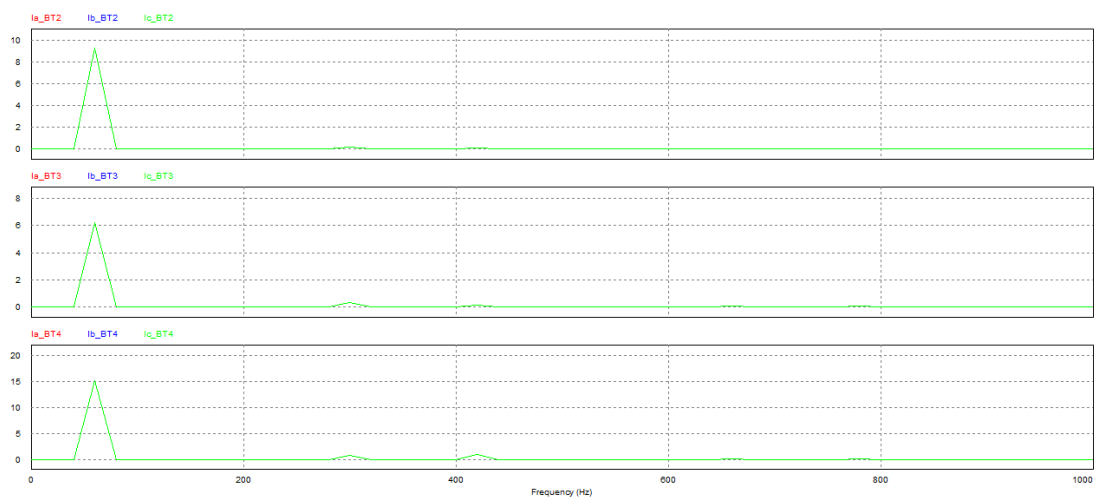
Figura 39 – Medição da THDi a montante dos transformadores após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Notaram-se que as THDis a montante do QGBT-4 aumentaram em relação a modelagem inicial, portanto para analisar o motivo do aumento da THDi recorreram-se aos espectros harmônicos das correntes de linha, apresentados na Figura 40.

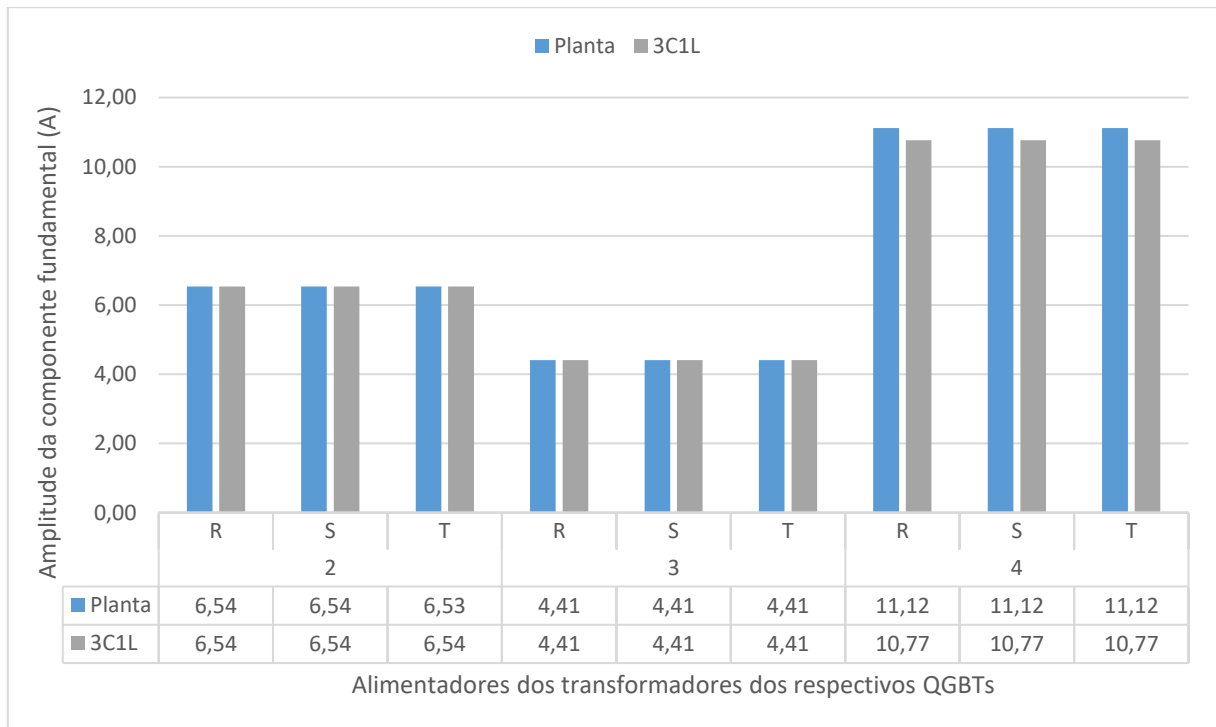
Figura 40 - Espectros harmônicos das correntes a montante dos transformadores após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio da FFT, verificou-se a redução do valor da componente fundamental depois da conexão do filtro *shunt* 3C1L, de acordo com a Figura 41.

Figura 41 – Medição da componente fundamental da corrente a montante dos transformadores após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

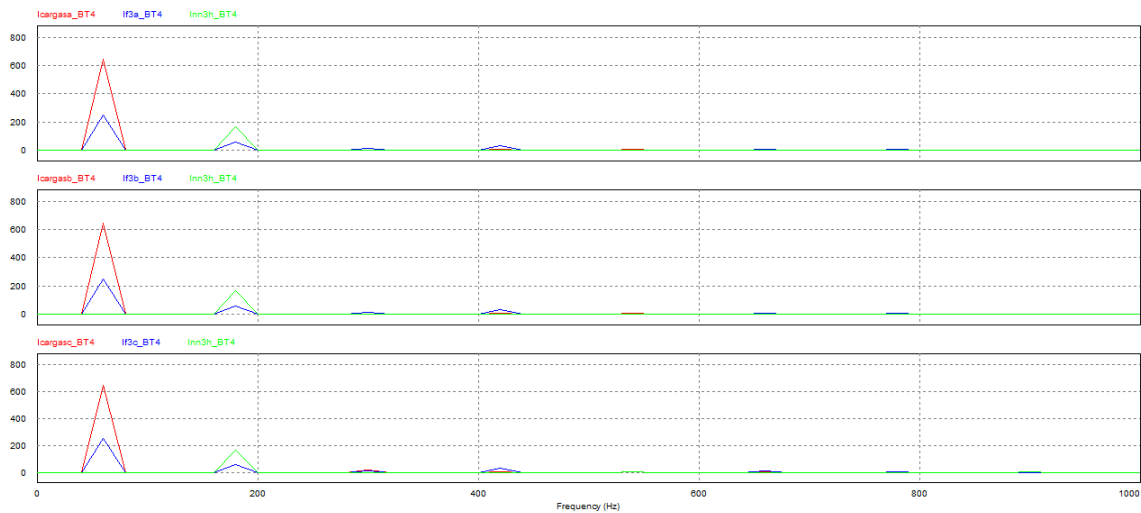
Logo, o aumento da THD_i a montante do QGBT-4 está relacionada com a redução da componente fundamental da corrente, como pode ser deduzido através da Equação (6). Sendo que a redução da componente fundamental ocorre devido a conexão em estrela do banco capacitivo, isto é, o valor da potência reativa capacitiva fornecida pelo filtro com topologia 3C1L é maior que o valor fornecido pelo banco capacitivo conectado em delta, uma vez que são utilizados valores comerciais de unidades capacitivas.

As harmônicas de sequência zero ficam “aprisionadas” no delta dos transformadores, isto é, mesmo sem o filtro não ocorre a presença das harmônicas homopolares a montante dos transformadores, portanto, o confinamento das correntes harmônicas de 3ª ordem no filtro *shunt* 3C1L não influencia as THD_is a montante dos transformadores.

4.1.1.2.5 Desempenho do filtro *shunt* 3C1L

Para avaliar a eficiência da filtragem, obteve-se o espectro harmônico da corrente de carga (I_{cargas}) e do filtro *shunt* 3C1L (I_{r3} e I_{nn3h}), conforme se constata na Figura 42.

Figura 42 - Espectro harmônico da corrente na carga, do banco capacitivo trifásico e do reator monofásico do filtro *shunt* 3C1L

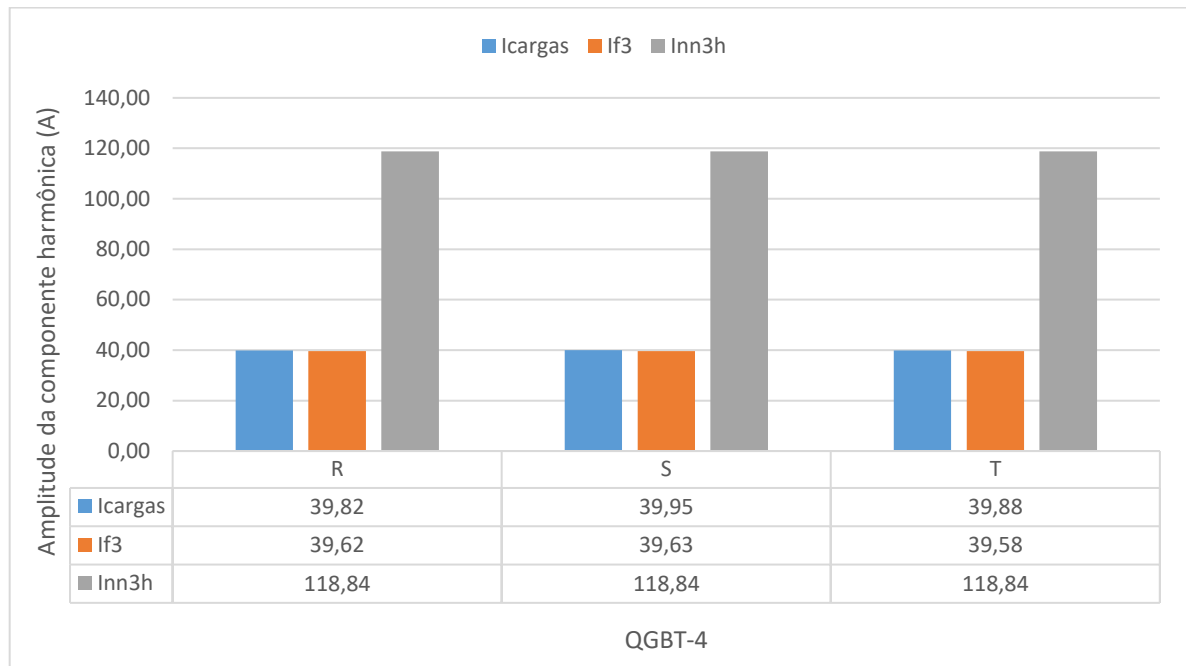


Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio da FFT, percebeu-se que o banco de capacitores (I_{f3}) do QGBT-4 apresenta praticamente duas parcelas de corrente, uma na frequência de ressonância e outra na frequência fundamental, 60 Hz. Sendo que na frequência da 3ª harmônica, a curva vermelha está praticamente superposta à curva azul, o que indica que o filtro apresenta desempenho adequado.

Ademais, notou-se que o reator monofásico (I_{nn3h}) apresenta somente uma parcela de corrente, que corresponde ao somatório das harmônicas de terceira ordem que percorrem o banco de capacitores do filtro *shunt* 3C1L.

Com o objetivo de analisar a amplitude da corrente harmônica de 3ª ordem correspondente a carga e ao filtro *shunt* 3C1L, obtiveram-se seus respectivos valores, como denota a Figura 43.

Figura 43 – Desempenho do filtro *shunt* 3C1L

Fonte: Elaboração Própria (2019).

Averiguou-se que apenas uma pequena parcela da componente de terceira harmônica não percorre o filtro *shunt* 3C1L, devido à resistência do reator monofásico (R_{sh1}) que corresponde a não-idealidade do indutor, e está associada ao fator de qualidade do filtro, de acordo com a Equação (26).

4.1.1.2.6 Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014

Com os dados obtidos das amplitudes das componentes harmônicas após a conexão do filtro 3C1L, avaliou-se a distorção harmônica da corrente em cada QGBT, adotando a recomendação da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014).

Os limites das componentes harmônicas de corrente de ordem ímpar para sistemas com tensão de 120 V a 69 kV dependem do parâmetro I_{sc}/I_L , sendo I_{sc} a corrente de curto-circuito obtida de acordo com as Equações (10), (11), (12).

Os valores das correntes de curto-circuito nos QGBTs e as grandezas necessárias para calcular a faixa I_{sc}/I_L , admitindo a corrente máxima demandada pela carga na componente de frequência fundamental (I_L) igual a corrente medida no alimentador (I_{sef}), constam na Tabela 26.

Tabela 26 –Parâmetro I_{sc}/I_L após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

QGBT	Z_B (m Ω)	Z_{pu} (%)	Z_{trafo} (m Ω)	I_{sc} (kA)	I_L (A)	I_{sc}/I_L
2	288,80	5,83	16,84	13,06	237,32	55,03
					237,31	55,03
					237,28	55,04
3	288,80	7,30	21,08	10,44	160,39	65,09
					160,38	65,10
					160,37	65,10
4	288,80	7,30	21,08	10,44	391,39	26,67
					391,35	26,68
					391,32	26,68

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os dados medidos na simulação, calculou-se para cada fase dos QGBTs o maior valor percentil medido entre harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme mostrado na Tabela 27.

Tabela 27 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

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%
	5,7%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	6,2%
3	7,3%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	9,2%
	7,4%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	9,2%
	7,4%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	9,2%
4	6,5%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	8,4%
	6,5%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	8,4%
	6,5%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	8,4%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Os valores percentis no QGBT-2 e QGBT-3 devem ser avaliados para o parâmetro I_{sc}/I_L entre 50 e 100, contudo no caso do QGBT-4 os limites estão associados a faixa I_{sc}/I_L entre 20 e 50.

A partir da análise dos dados, percebeu-se que o QGBT-2 e QGBT-3 respeitam os limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014). Por outro lado, o QGBT-4 excede nas três fases o limite de 8% da TDD.

Dessa forma, constatou-se que a filtragem da harmônica de 3ª ordem no QGBT-4 não foi o suficiente para atender os limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), visto que a inserção do filtro *shunt* 3C1L acarretou em um aumento da componente harmônica de 7ª ordem, que colaborou de maneira significativa com o aumento da TDD.

4.1.2 Sistema trifásico real

O sistema trifásico com elevado desequilíbrio entre as fases, no estudo em questão, retrata o sistema real obtido mediante as medições fornecidas pela instituição. A modelagem da planta elétrica comercial para analisar os dois casos de carga típica, foi realizada de acordo com a metodologia adotada no capítulo 3, com intuito de obter um modelo da planta elétrica que apresente uma boa aproximação com as medições realizadas pela instituição.

As taxas de distorção harmônica da corrente e da tensão nas três fases dos QGBTs foram calculadas para cada ponto de medição, obtendo em seguida o valor percentil de 95% para cada conjunto de dados.

A componente fundamental da corrente em cada fase dos QGBTs foi determinada pelo valor percentil de 95% de cada conjunto de dados. Já os valores da tensão eficaz de fase-neutro da componente fundamental, do fator de potência, da potência reativa indutiva e da potência aparente foram determinados pela média aritmética de cada conjunto de dados das três fases de cada QGBT.

Os resultados obtidos após o tratamento dos dados adquiridos nas medições estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Dados tratados das medições nos QGBTs para o sistema desequilibrado

QGBT	Fase	$V_{1,ef}$ (V)	$I_{1,ef}$ (A)	FP	THD_i (%)	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: Elaboração própria (2019).

Para determinar a carga monofásica do tipo RL, estimou-se a potência reativa injetada pelos bancos capacitivos conectados em delta nos QGBT-3 e QGBT-4, por meio do termo de referência (IFSC, 2009).

Os resultados dos valores de potências nos QGBTs realizados para sistema desequilibrado com base no termo de referência (IFSC, 2009), podem ser observados na Tabela 29.

Tabela 29 – Valores de potências nos QGBTs referentes ao sistema desequilibrado

	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
S (kVA)	53,44	54,42	51,97	38,32	31,43	40,06	82,97	112,98	80,24
P (kW)	50,72	52,73	48,96	37,80	31,14	39,24	80,88	110,80	77,78
FP	0,95	0,97	0,94	0,99	0,99	0,98	0,97	0,98	0,97
Q _{indutivo} (kVAR)	16,83	12,48	17,36	20,77	17,03	21,71	44,96	61,23	43,48
	RST			RST			RST		
Q _{cap} (kVAR) ^a	-			31,04			78,67		
^a Potência reativa capacitiva trifásica necessária para correção do fator de deslocamento resultante das medições.									

Fonte: Elaboração própria (2019).

A quantidade de unidades capacitivas utilizadas nos QGBTs para corrigir o fator de deslocamento da planta elétrica constam na Tabela 30.

Tabela 30 – Unidades capacitivas para cada QGBT referente ao sistema desequilibrado

QGBT	Unidades capacitivas de 45,90 uF	Unidades capacitivas de 91,84 uF	Potência reativa do banco de capacitores (kvar) ^a
2	-	-	-
3	-	6	30,00
4	6	12	75,00
^a Potência reativa trifásica fornecida pelos bancos de capacitores conectados em delta.			

Fonte: Elaboração própria (2019).

Em seguida, com os dados das medições fornecidos pela instituição, implementou-se um modelo com uma estrutura trifásica com cargas monofásicas do tipo RL. Para determinação das cargas lineares dos QGBTs aplicaram-se as Equações (15) a (22) e os resultados podem ser observados na Tabela 31.

Tabela 31 – Modelagem das cargas lineares nos QGBTs para o sistema desequilibrado

QGBT	Fase	Z ($m\Omega$)	R_l ($m\Omega$)	L_l (μH)	Ângulo ($^\circ$)
2	R	962,55	915,22	790,79	18,04
	S	933,65	911,60	535,05	12,48
	T	1012,92	956,57	883,64	19,20
3	R	$1,21 \cdot 10^3$	$1,02 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^3$	8,13
	S	$1,48 \cdot 10^3$	$1,24 \cdot 10^3$	$2,12 \cdot 10^3$	6,14
	T	$1,18 \cdot 10^3$	$0,99 \cdot 10^3$	$1,70 \cdot 10^3$	10,81
4	R	550,06	462,29	790,70	8,51
	S	398,13	334,60	572,30	8,02
	T	582,73	489,74	837,66	10,08

Fonte: Elaboração própria (2019).

As correntes em frequências harmônicas adquiridas nas medições foram modeladas por fontes de correntes conectadas em paralelo com a carga RL, sendo que para o sistema real as amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares foram determinadas pelo valor percentil de 95% de cada conjunto de dados medidos, conforme apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 – Amplitudes das correntes harmônicas de ordens ímpares para o sistema desequilibrado

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: Elaboração própria (2019).

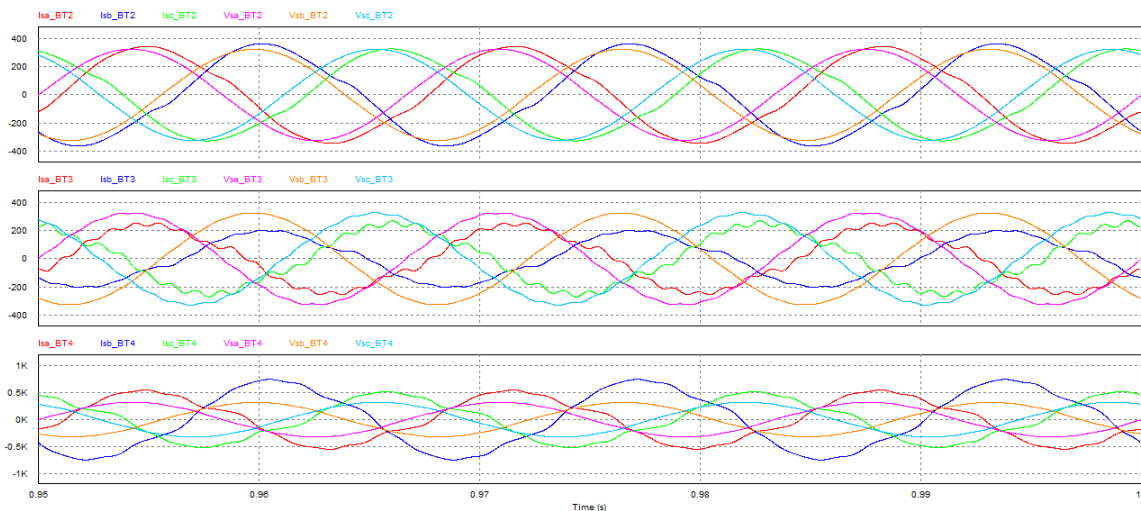
As correntes harmônicas da Tabela 32 apresentam defasagem de acordo com as Equações (2), (3) e (4), sendo os ângulos de cada componente harmônica de corrente correspondente aos ângulos de deslocamento entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, em suas respectivas fases dos QGBTs.

4.1.2.1 Validação do modelo proposto

Para validar o modelo proposto para o sistema real com carga linear e não linear, efetuou-se a simulação da planta elétrica modelada que consta no Apêndice C.

A partir da simulação da planta elétrica, notou-se o comportamento das componentes de tensão e corrente vistas pelos alimentadores, medidas pelo voltímetro (Vs) e amperímetro (Is) dos respectivos QGBTs, apresentados na Figura 44.

Figura 44 - Tensão e corrente vistas pelo alimentador em cada fase dos respectivos QGBTs no sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração própria (2019).

Posteriormente, mediram-se os valores das grandezas referentes aos alimentadores, os quais são apresentados na Tabela 33.

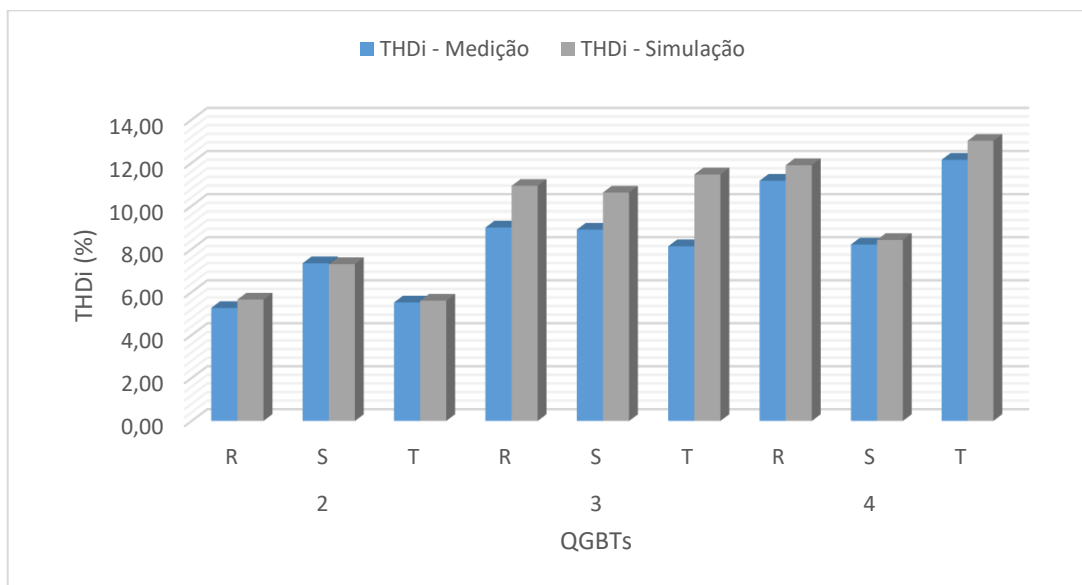
Tabela 33 – Valores das grandezas referentes a simulação do modelo proposto para o sistema real

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: Elaboração própria (2019).

Com os dados obtidos na simulação, verificou-se que a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase dos QGBTs apresenta um valor aproximado entre o modelo proposto e as medições no PCC, conforme mostra a Figura 45.

Figura 45 - THD_i para cada fase dos QGBTs no sistema desequilibrado obtidas através de medição e de simulação do modelo proposto

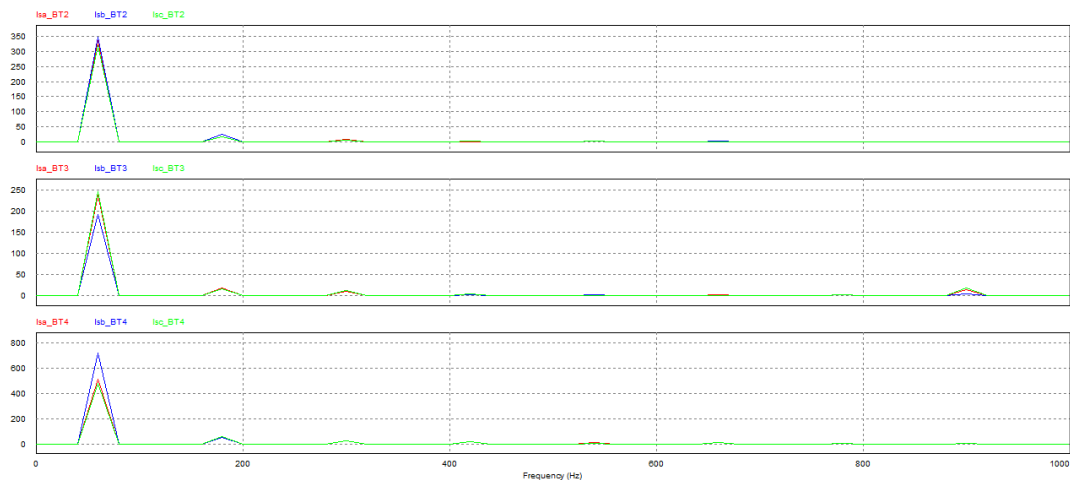


Fonte: Elaboração Própria (2019).

4.1.2.1.1 Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs

Para avaliar as amplitudes das componentes harmônicas do modelo proposto para o sistema real, obteve-se o espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, como apresentados na Figura 46.

Figura 46 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após analisar a FFT, realizaram-se as medições dos valores referentes às componentes harmônicas da corrente em cada fase dos QGBTs, conforme mostra a Tabela 34.

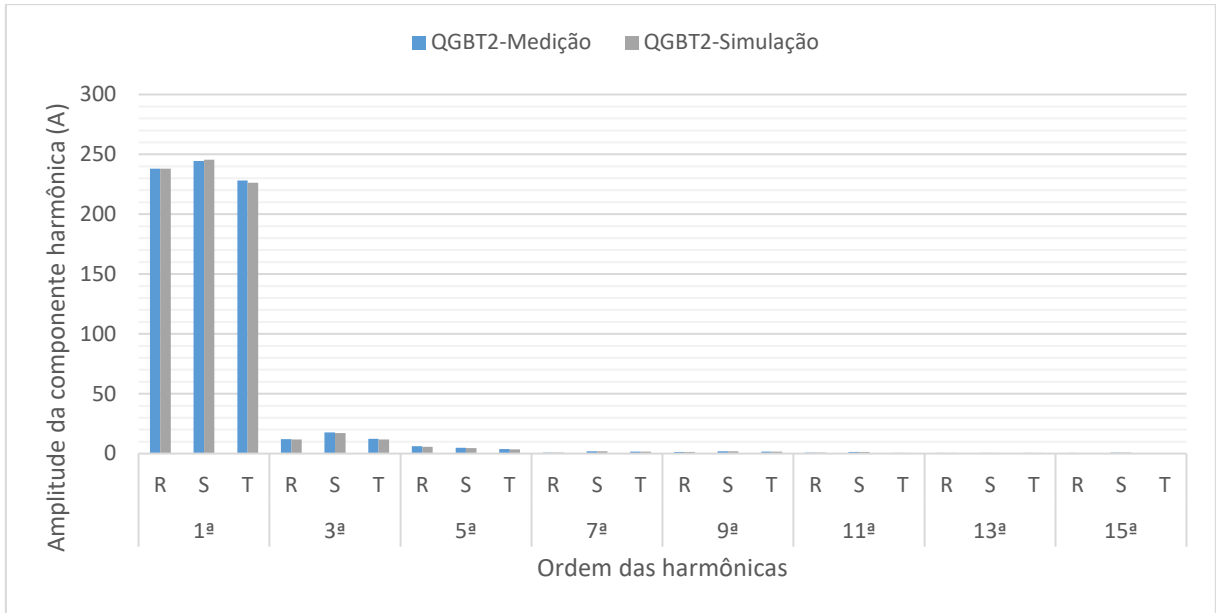
Tabela 34 – Amplitudes das correntes harmônicas obtidas por meio de simulação para o sistema real

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

Fonte: Elaboração própria (2019).

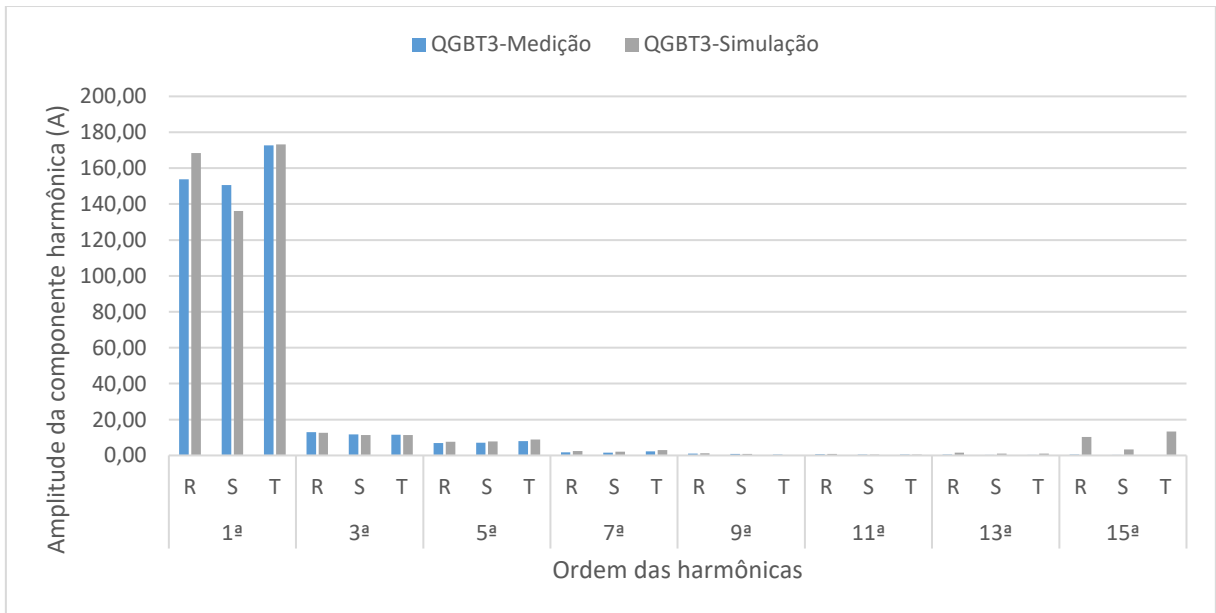
Posteriormente, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas obtidas por meio da simulação e dos dados tratados das medições para o sistema desequilibrado, conforme mostra a Figura 47, Figura 48 e Figura 49.

Figura 47 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-2 para o sistema real



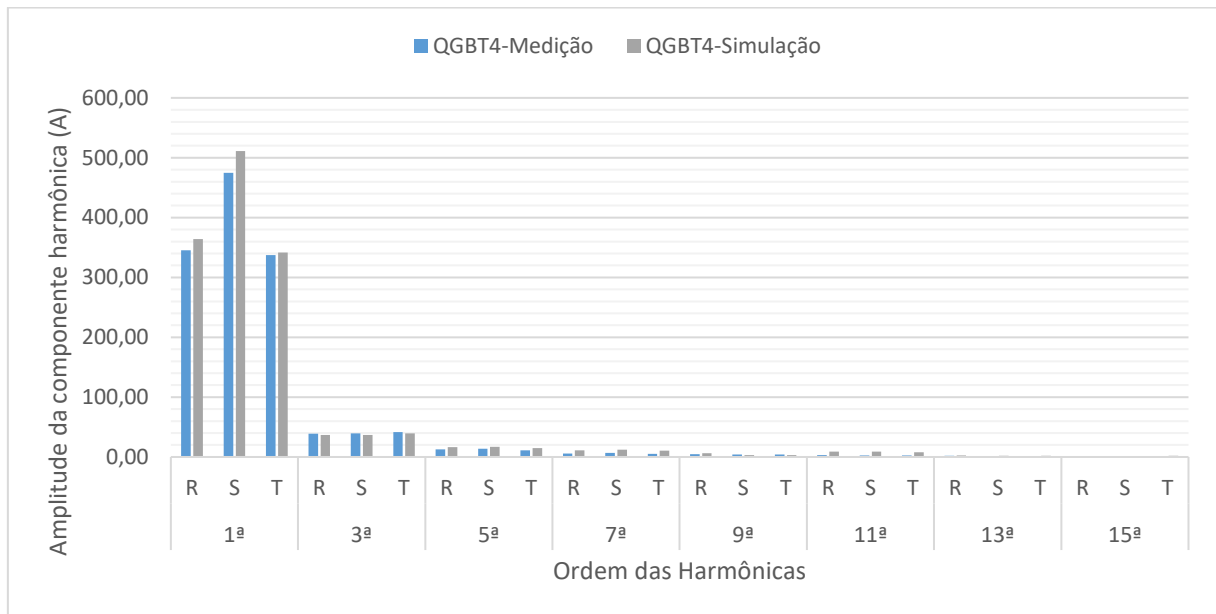
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 48 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-3 para o sistema real



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 49 - Amplitudes das correntes harmônicas em cada fase do QGBT-4 para o sistema real



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Perceberam-se que as componentes harmônicas do modelo proposto e dos dados tratados das medições, apresentam valores aproximados, isto é, o modelo proposto reproduz de maneira satisfatória a planta elétrica do sistema real.

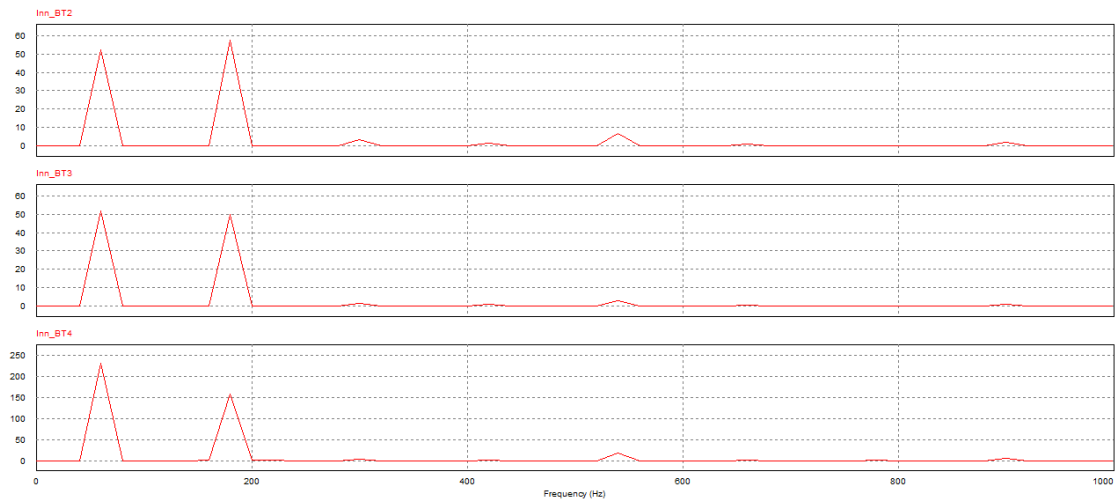
A diferença nos valores das componentes fundamentais nos QGBT-3 e QGBT-4, deve-se a inexistência de medições da potência reativa injetada no sistema pelo banco capacitivo dos respectivos QGBTs.

Ademais, analisando a amplitude das correntes harmônicas em cada fase dos QGBTs, notou-se um aumento elevado nas componentes harmônicas de 15ª e 11ª ordem no QGBT-3 e QGBT-4 respectivamente, devido a ressonância entre o banco de capacitores estimado e a impedância da fonte.

4.1.2.1.2 *Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs*

Para avaliar a corrente no condutor de neutro em cada QGBT no sistema desequilibrado, obteve-se o espectro harmônico, conforme se verifica na Figura 50.

Figura 50 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs para o sistema real



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Em seguida, realizaram-se as medições das componentes harmônicas presentes no condutor de neutro de cada QGBT, como mostrado na Tabela 35, onde constatou-se o aparecimento das componentes harmônicas na frequência fundamental, devido ao desequilíbrio entre as correntes de fase.

Tabela 35 – Amplitudes das correntes harmônicas no condutor de neutro dos QGBTs para o sistema desequilibrado

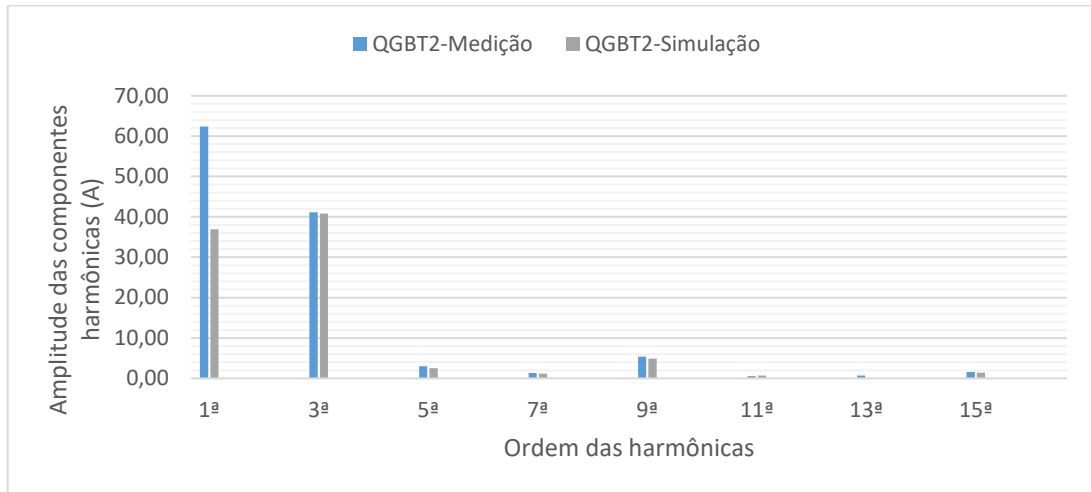
Componente harmônica de corrente (A)	QGBT					
	2		3		4	
	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b	Medição ^a	Simulação ^b
1 ^a	62,40	36,96	53,53	36,77	158,04	164,36
3 ^a	41,11	40,84	36,03	35,42	115,78	112,85
5 ^a	3,04	2,54	4,01	0,87	7,38	1,75
7 ^a	1,32	1,16	2,05	0,66	3,85	0,95
9 ^a	5,42	4,91	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

^a Valores das medições do sistema real;
^b Valores das simulações do sistema real.

Fonte: Elaboração própria (2019).

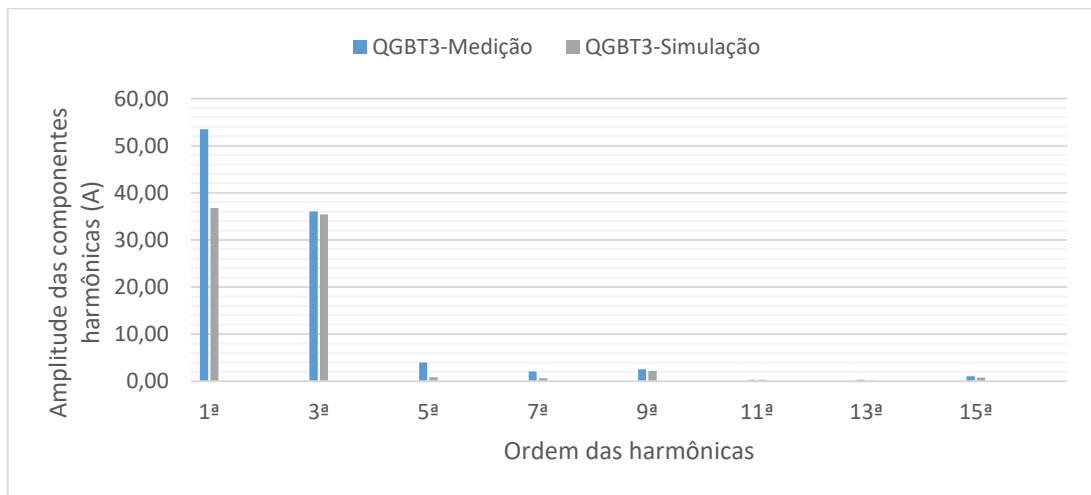
Por meio destas informações, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas no condutor de neutro de cada QGBT, obtidas por meio da simulação do modelo proposto e das medições para o sistema desequilibrado, conforme mostra a Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

Figura 51 - Amplitude das harmônicas no condutor de neutro do QGBT-2 para o sistema real



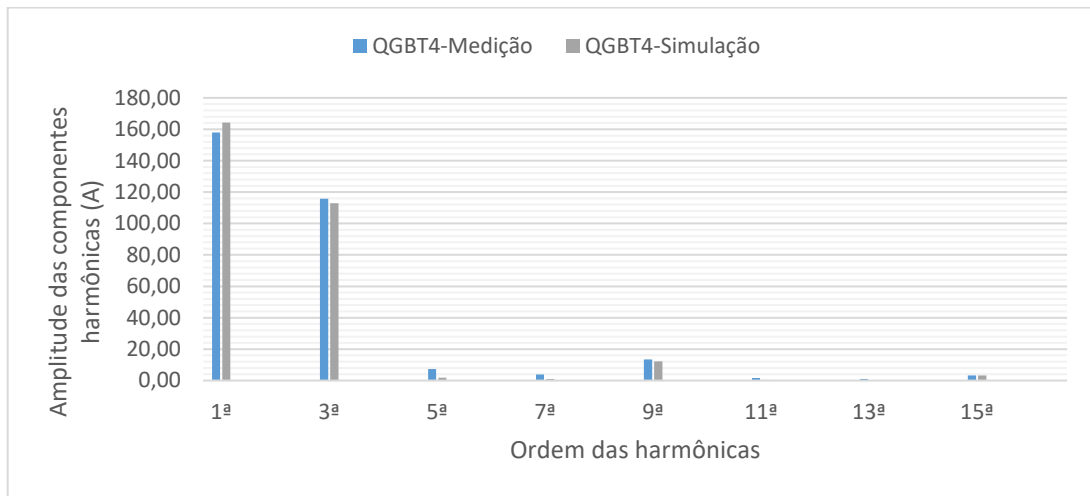
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 52 - Amplitude das harmônicas no condutor de neutro do QGBT-3 para o sistema real



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 53 - Amplitude das harmônicas no condutor de neutro do QGBT-4 para o sistema real



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Com base nos dados obtidos, pode-se verificar que o sistema real com elevado desequilíbrio entre as correntes de fase colabora de forma expressiva para o aumento da corrente no condutor de neutro, devido a presença das componentes harmônicas de frequência fundamental. No entanto, percebe-se que a corrente no condutor de neutro possui forte influência das harmônicas de sequência zero, principalmente da harmônica de terceira ordem.

O valor eficaz total da corrente no condutor de neutro ($I_{nn,ef}$) em cada QGBT, consta na Tabela 36.

Tabela 36 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, referente a simulação do modelo proposto para o sistema desequilibrado

QGBT	$I_{nn,ef}$ (A)
2	55,39
3	51,12
4	199,78

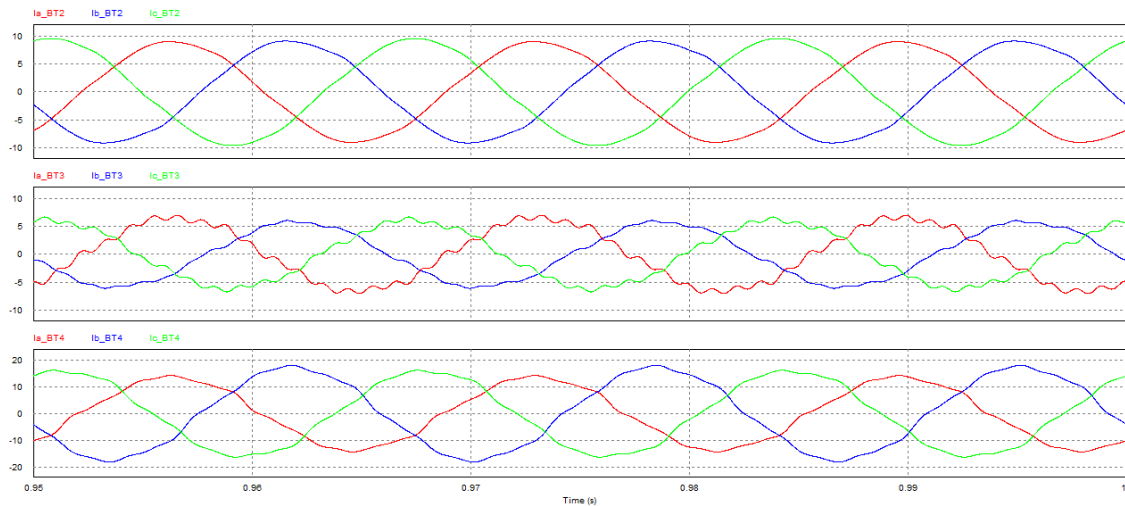
Fonte: Elaboração própria (2019).

Os resultados obtidos a partir da simulação da planta elétrica estão próximos dos valores medidos; as diferenças são aceitáveis visto que se trata de um modelo simplificado.

4.1.2.1.3 Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores

Por meio da simulação, observou-se o comportamento das correntes de linha vistas a montante dos transformadores para sistema desequilibrado, Figura 54.

Figura 54 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Logo depois, obtiveram-se os valores da THD_i referente a cada fase dos transformadores, como apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – THD_i vistas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs no sistema real

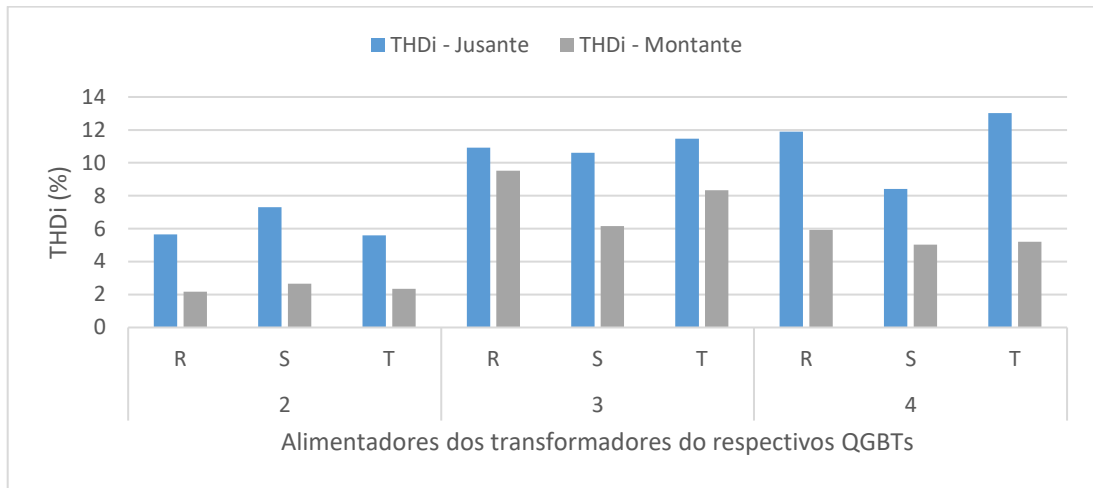
QGBT	Fase	THD_i (%)
2	R	2,17
	S	2,66
	T	2,34
3	R	9,52
	S	6,15
	T	8,34
4	R	5,93
	S	5,04
	T	5,20

Fonte: Elaboração própria (2019).

Analisando os dados, notou-se que a distorção harmônica da corrente a montante dos transformadores é inferior aos valores medidos a jusante, Figura 55,

sendo que os valores a jusante dos transformadores correspondem aos valores simulados a montante dos QGBTs.

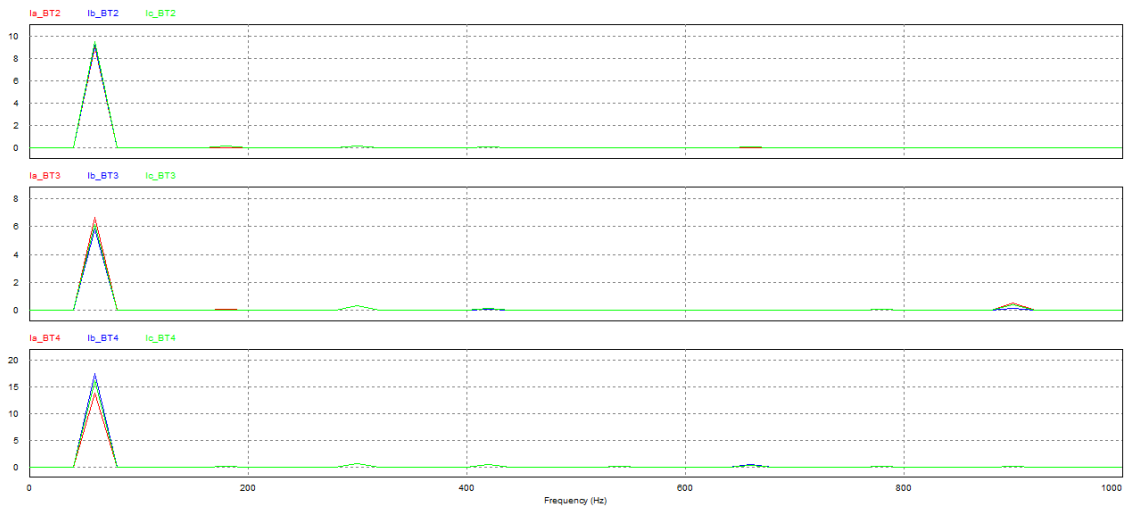
Figura 55 – Medição da THDi para cada fase a montante e a jusante dos transformadores responsáveis pela alimentação dos QGBTs no sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Com o intuito de analisar a redução da THDi a montante dos transformadores, recorreu-se ao espectro harmônico das correntes de linha, conforme mostra a Figura 56.

Figura 56 - Espectro harmônico da corrente de linha a montante dos transformadores no sistema real



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Imediatamente, mediram-se as amplitudes das componentes harmônicas da corrente de linha em cada fase, Tabela 38.

Tabela 38 – Amplitudes das correntes harmônicas a montante dos transformadores dos respectivos QGBTs para o sistema desequilibrado

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

Fonte: Elaboração própria (2019).

Desta maneira, observou-se que no sistema real as correntes harmônicas *triplens* circulam a montante dos transformadores, devido ao desequilíbrio entre as correntes de fase, ou seja, em um sistema desequilibrado uma parcela das componentes homopolares não fica “aprisionada” no delta dos transformadores.

4.1.2.1.4 Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014

Para avaliar os níveis harmônicos de corrente na planta elétrica modelada utilizou-se a recomendação da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), sendo o PCC a entrada de alimentação de cada QGBT, e a corrente de curto-circuito obtida de acordo com as Equações (10), (11) e (12).

Os resultados dos cálculos das correntes de curto-circuito nos QGBTs e as grandezas necessárias para calcular a faixa I_{SC}/I_L constam na Tabela 39, sendo o valor da corrente máxima demandada pela carga na componente de frequência fundamental (I_L) igual a corrente medida no alimentador (I_{sef}).

Tabela 39 – Valores das grandezas necessárias para determinar o parâmetro I_{sc}/I_L

QGBT	Z_B (m Ω)	Z_{pu} (%)	Z_{trafo} (m Ω)	I_{sc} (kA)	I_L (A)	I_{sc}/I_L
2	288,80	5,83	16,84	13,06	238,53	54,75
					246,33	53,02
					226,60	57,63
3	288,80	7,30	21,08	10,44	169,33	77,13
					136,87	76,28
					174,42	59,86
4	288,80	7,30	21,08	10,44	366,70	28,47
					513,07	20,35
					344,71	30,29

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os dados medidos na simulação, calculou-se para cada fase dos QGBTs o maior valor percentil medido entre harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme mostrado na Tabela 40.

Tabela 40 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD

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: Elaboração própria (2019).

Com base na Tabela 39, os níveis de distorção harmônica da corrente no QGBT-2 e QGBT-3 devem ser avaliados para o parâmetro I_{sc}/I_L entre 50 e 100, no entanto no caso do QGBT-4 os limites estão associados a faixa I_{sc}/I_L entre 20 e 50.

Logo, examinando a Tabela 40 percebeu-se que o QGBT-2 respeita os limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014). Por outro lado, o QGBT-

3 excede o limite de 4,5% para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre 11 e 17, devido a ressonância na componente harmônica de 15ª ordem, entre o banco de capacitores estimado e a impedância da fonte.

Além disso, constatou que o QGBT-4 excede os valores sugeridos, visto que o limite de 8% da TDD é extrapolado nas três fases, da mesma maneira que o limite de 7% para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre 3 e 11.

4.1.2.2 Projeto do filtro shunt 3C1L

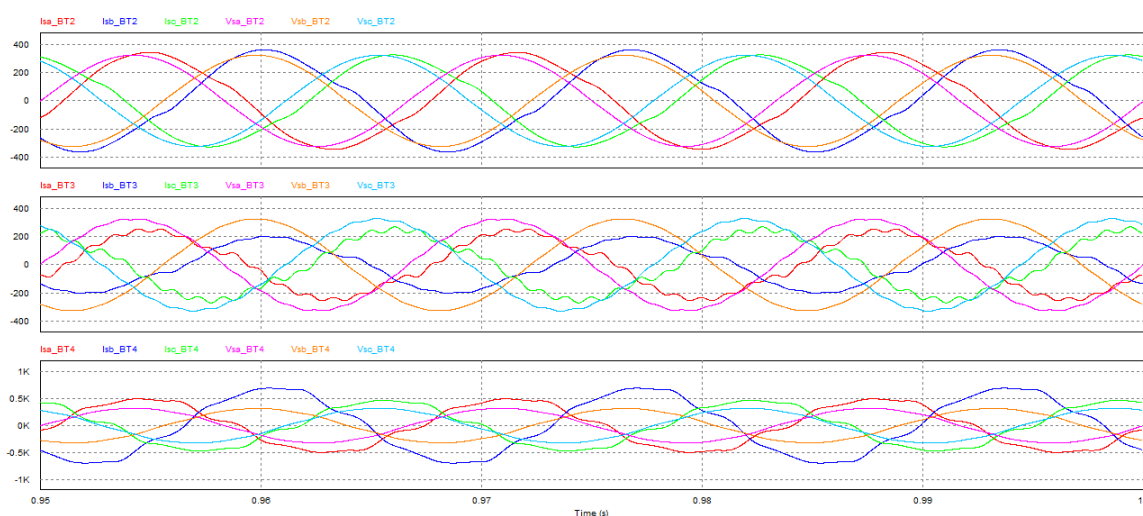
Para o sistema desequilibrado, utilizou-se no transformador trifásico a seco de 500 kVA (380/220 V) correspondente ao QGBT-4, a unidade de filtragem projetada na subseção 4.1.1.2 (sistema equilibrado) devido a característica do filtro com topologia 3C1L.

4.1.2.2.1 Análise da THD_i nos QGBTs

Para avaliar a THD_i no sistema real após a inserção do filtro *shunt* 3C1L, recorreu-se a simulação da planta elétrica modelada no Apêndice D.

Através da simulação, verificou-se o comportamento das componentes de tensão e corrente vistas pelos alimentadores, medidas pelo voltímetro (Vs) e amperímetro (Is) dos respectivos QGBTs, apresentados na Figura 57.

Figura 57 - Tensão e corrente vistas pelo alimentador para cada fase com o filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração própria (2019).

Em seguida, obtiveram-se os valores das grandezas referentes aos alimentadores, conforme a Tabela 41.

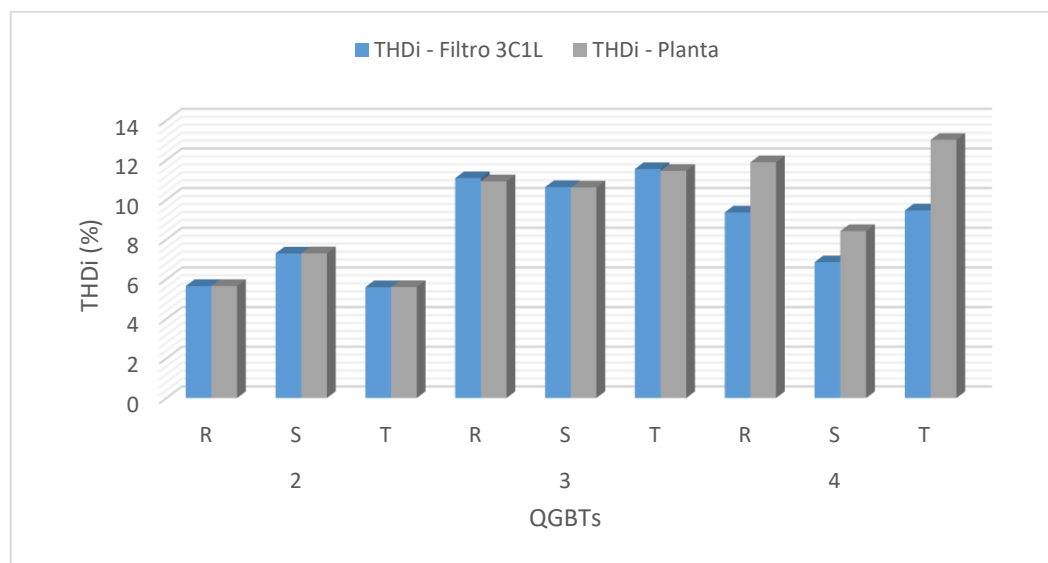
Tabela 41 – Valores das grandezas referentes aos alimentadores após a inserção do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado

QGBT	Fase	FP	THD_i (%)	V_{sef} (V)	I_{sef} (A)
2	R	0,95	5,65	229,34	238,63
	S	0,97	7,29	229,45	246,42
	T	0,94	5,59	229,27	226,69
3	R	0,94	11,09	229,73	169,42
	S	0,96	10,64	230,03	136,93
	T	0,94	11,55	229,54	174,51
4	R	0,99	9,36	229,02	354,44
	S	0,96	6,85	226,49	497,14
	T	0,99	9,46	229,25	333,87

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os dados obtidos após a conexão do filtro *shunt* 3C1L, verificou-se que a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase do QGBT-4 apresenta uma redução entre 18% e 27% em relação a planta elétrica modelada, como pode ser verificado na Figura 58.

Figura 58 - THD_i para cada fase dos QGBTs obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado



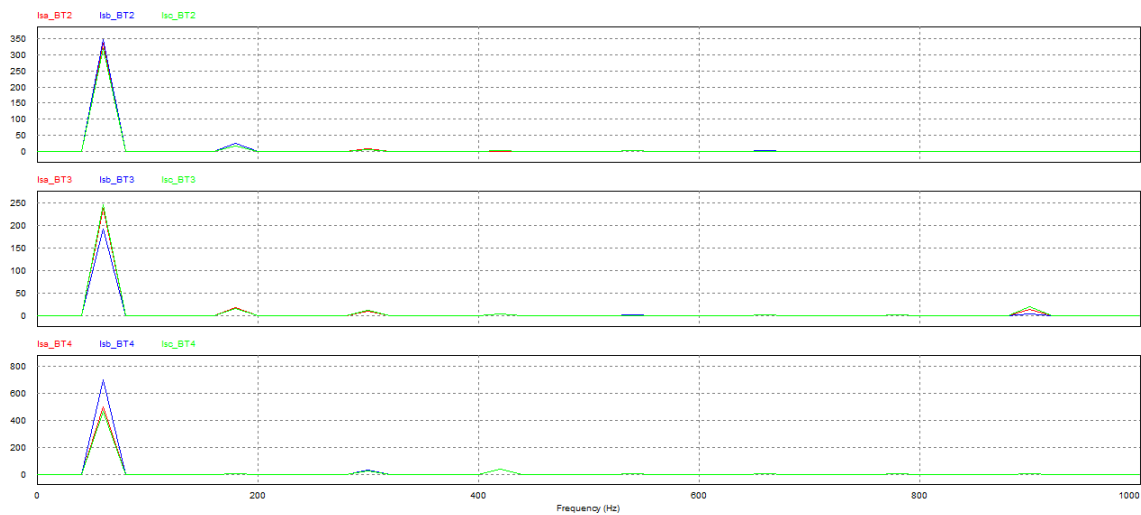
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Ademais, na Figura 58 observou-se que o caminho de baixa impedância criado pelo filtro *shunt* 3C1L no QGBT-4 não afetou a THD_i nos demais QGBTs, uma vez que apresentam uma diferença de no máximo 1,46%, quando comparados com os valores da planta elétrica modelada.

4.1.2.2.2 Amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs

Para avaliar a eficiência do filtro *shunt*, recorreu-se ao espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs, como apresentado na Figura 59.

Figura 59 – Espectro harmônico da corrente em cada fase dos QGBTs após a inserção do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após examinar a FFT, efetuaram-se as medições dos valores referentes às componentes harmônicas da corrente em cada fase, como expõe a Tabela 42, podendo analisar a eficiência do filtro e a influência do caminho de baixa impedância na planta elétrica.

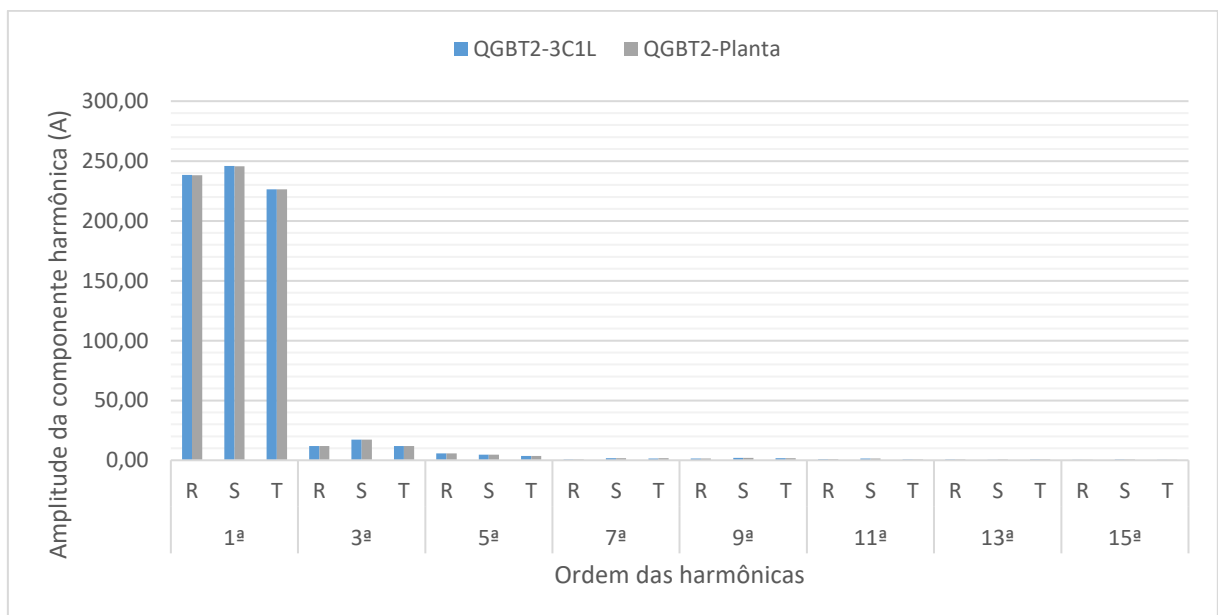
Tabela 42 – Amplitudes das correntes harmônicas no sistema desequilibrado obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT								
	2			3			4		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
1 ^a	238,26	245,76	226,33	168,40	136,15	173,35	352,91	495,98	332,38
3 ^a	11,80	17,20	11,91	12,69	11,43	11,32	3,11	3,32	2,87
5 ^a	5,74	4,55	3,56	7,67	7,89	8,85	20,01	20,82	18,69
7 ^a	0,71	1,73	1,56	2,68	2,35	3,18	25,55	26,04	24,57
9 ^a	1,37	1,90	1,65	1,12	0,83	0,25	2,64	3,73	4,17
11 ^a	0,84	1,41	0,67	1,26	0,96	0,83	2,80	2,90	2,76
13 ^a	0,54	0,52	0,57	1,77	1,28	1,34	1,20	1,13	1,16
15 ^a	0,44	0,74	0,27	10,54	3,12	13,49	1,29	1,13	1,62

Fonte: Elaboração própria (2019).

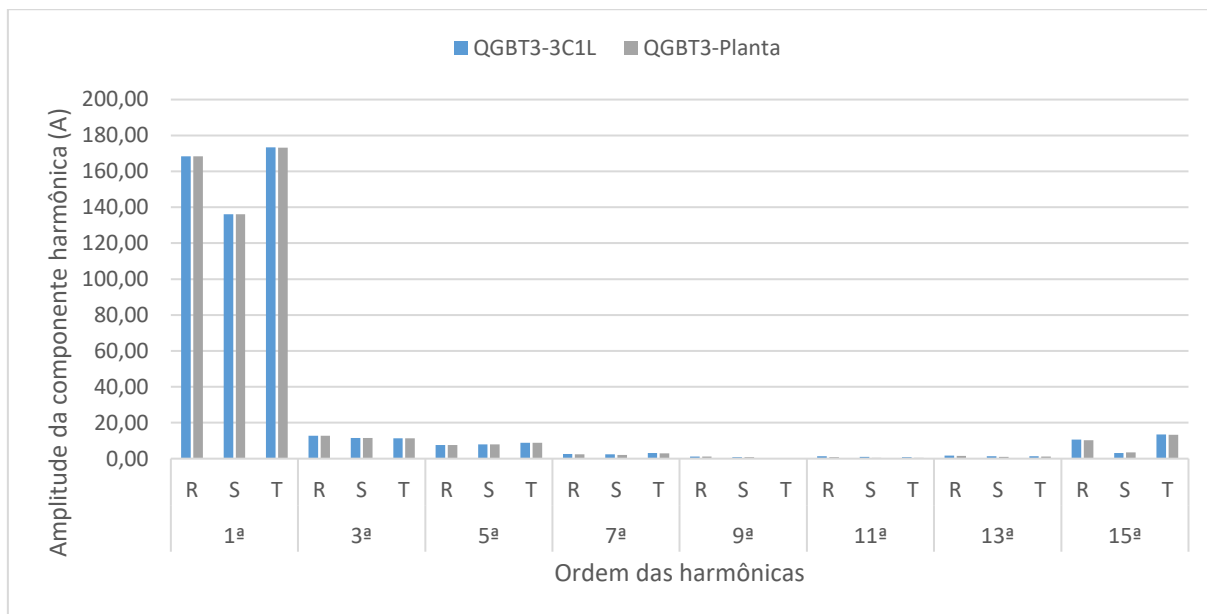
Após a simulação, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas em cada fase dos QGBTs entre a planta modelada e a planta elétrica com a inserção do filtro *shunt* 3C1L, conforme mostra a Figura 60, Figura 61 e Figura 62.

Figura 60 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-2 para o sistema real obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



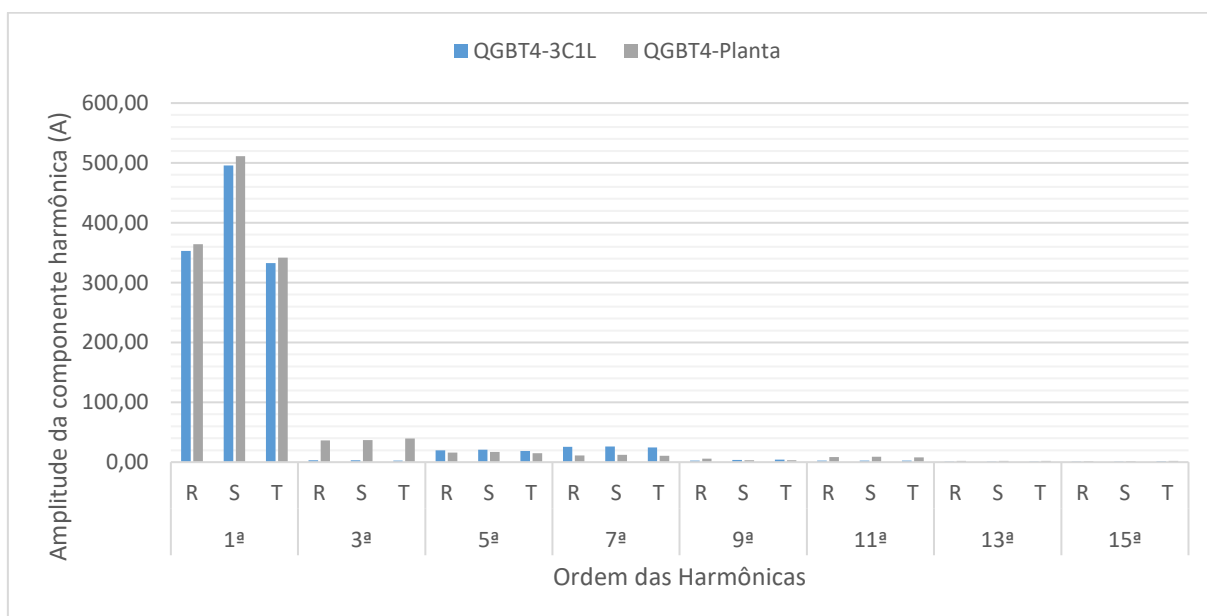
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 61 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-3 para o sistema real obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 62 - Amplitudes das correntes harmônicas de cada fase do QGBT-4 para o sistema real obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Analisando os dados obtidos, verificou-se que a inserção do filtro *shunt* 3C1L não influenciou as componentes harmônicas de corrente nos QGBT-2 e QGBT-3, conforme nota-se na Figura 60 e Figura 61.

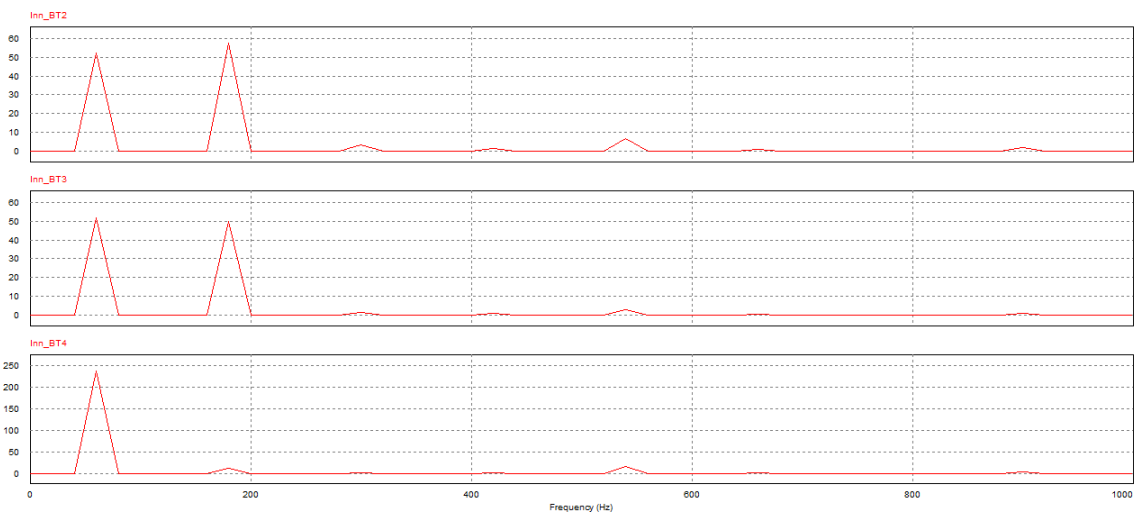
Contudo, notou-se na Figura 62 que o QGBT-4 apresenta uma eficiência de aproximadamente 92% na redução da componente harmônica de 3ª ordem, os resquícios da componente harmônica estão relacionados com o fator de qualidade do reator monofásico.

Além disso, a conexão do filtro *shunt* 3C1L no QGBT-4 corrigiu o problema de ressonância entre o banco de capacitores e a fonte, reduzindo a amplitude da componente harmônica de 11ª ordem. No entanto, aumentou de maneira significativa a componente harmônica de 7ª ordem.

4.1.2.2.3 Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs

Com intuito de avaliar a influência do filtro *shunt* 3C1L na corrente do condutor de neutro dos QGBTs no sistema desequilibrado, observaram-se seus respectivos espectros harmônicos, como demonstra a Figura 63.

Figura 63 – Espectro harmônico da corrente no neutro dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Após analisar a FFT, efetuaram-se as medições dos valores referentes às amplitudes das harmônicas *triplens* no condutor de neutro dos QGBTs, presentes na Tabela 43.

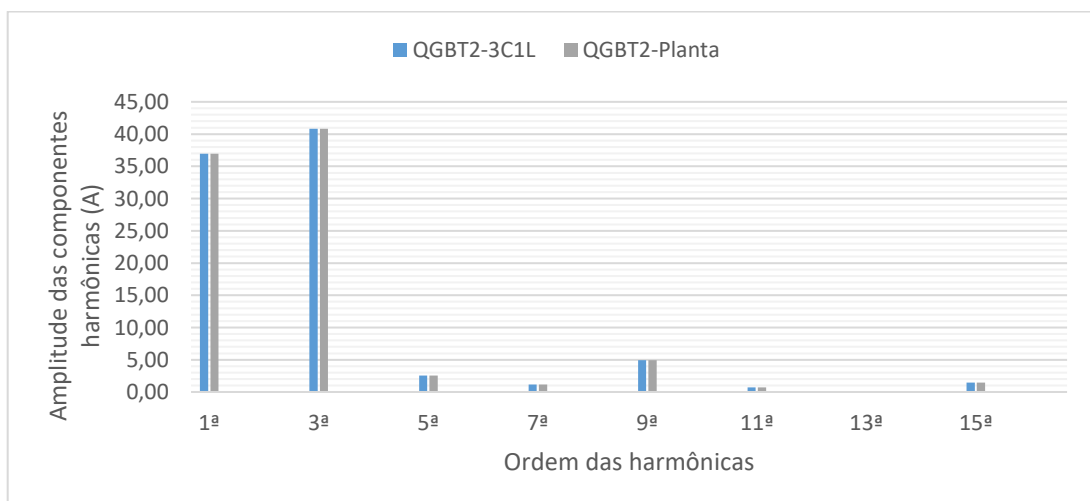
Tabela 43 – Amplitudes das correntes harmônicas no condutor de neutro dos QGBTs no sistema desequilibrado obtidas por simulação

Componente harmônica de corrente (A)	QGBT					
	2		3		4	
	3C1L	Planta	3C1L	Planta	3C1L	Planta
1 ^a	36,97	36,96	36,78	36,77	168,24	164,36
3 ^a	40,84	40,84	35,42	35,42	8,21	112,85
5 ^a	2,55	2,54	0,86	0,87	1,38	1,75
7 ^a	1,17	1,16	0,66	0,66	0,49	0,95
9 ^a	4,91	4,91	2,19	2,19	10,54	12,17
11 ^a	0,70	0,71	0,30	0,30	0,39	0,40
13 ^a	0,08	0,08	0,16	0,16	0,11	0,14
15 ^a	1,44	1,44	0,77	0,77	2,85	3,26

Fonte: Elaboração própria (2019).

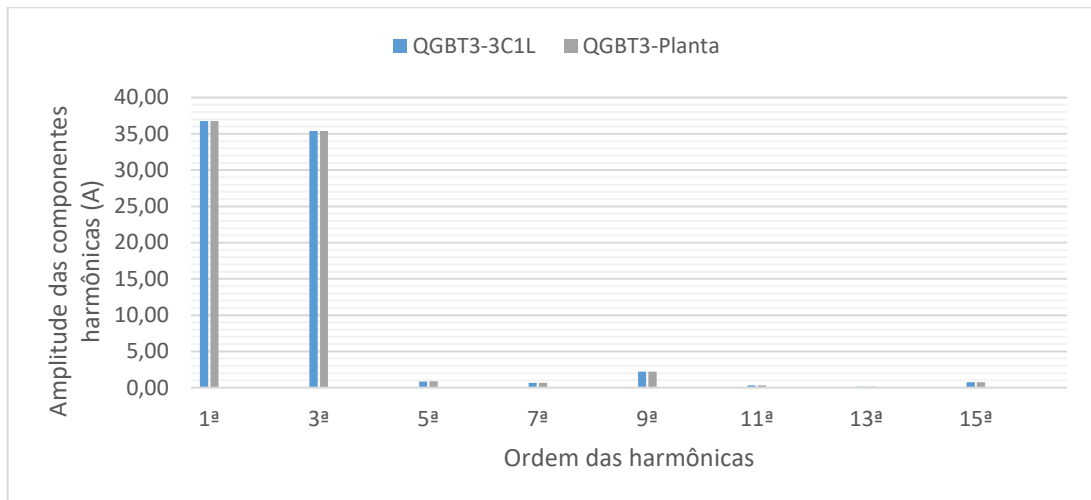
Posteriormente, compararam-se as amplitudes das componentes harmônicas no condutor de neutro de cada QGBT, obtidas por meio da modelagem inicial e posteriormente com a inserção do filtro *shunt* 3C1L, de acordo com a Figura 64, Figura 65 e Figura 66.

Figura 64 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-2 com filtro 3C1L para o sistema desequilibrado



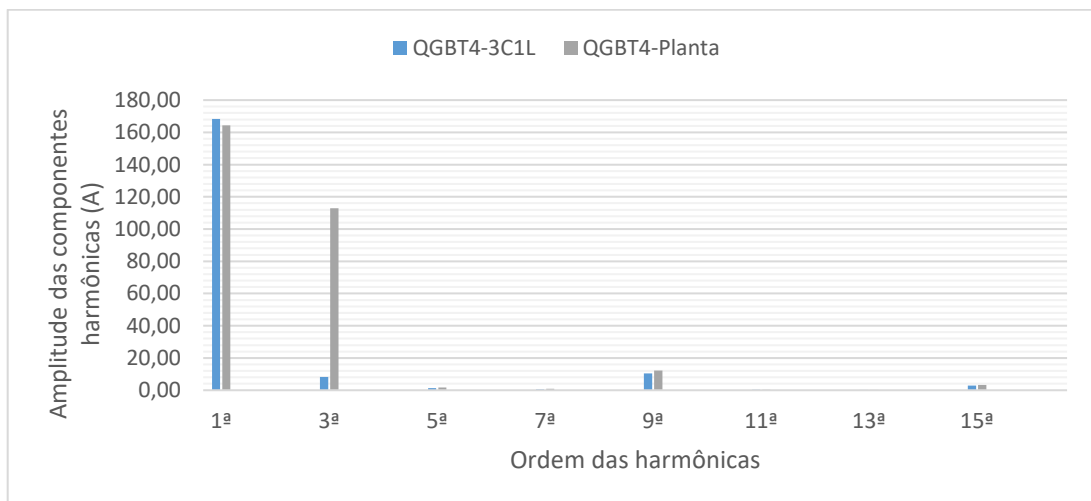
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 65 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-3 com filtro 3C1L para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Figura 66 - Amplitude das harmônicas de corrente do condutor de neutro no QGBT-4 com filtro 3C1L para o sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio das medições das componentes harmônicas presentes no neutro de cada QGBT, notou-se que a conexão do filtro *shunt* 3C1L não afeta as harmônicas de sequência zero no neutro do QGBT-2 e QGBT-3. No entanto, percebeu-se uma redução da componente harmônica de 3ª ordem no QGBT-4 em aproximadamente 92%.

O valor eficaz total da corrente no condutor de neutro ($I_{nn,ef}$) em cada QGBT após a inserção do filtro *shunt* 3C1L, consta na Tabela 44.

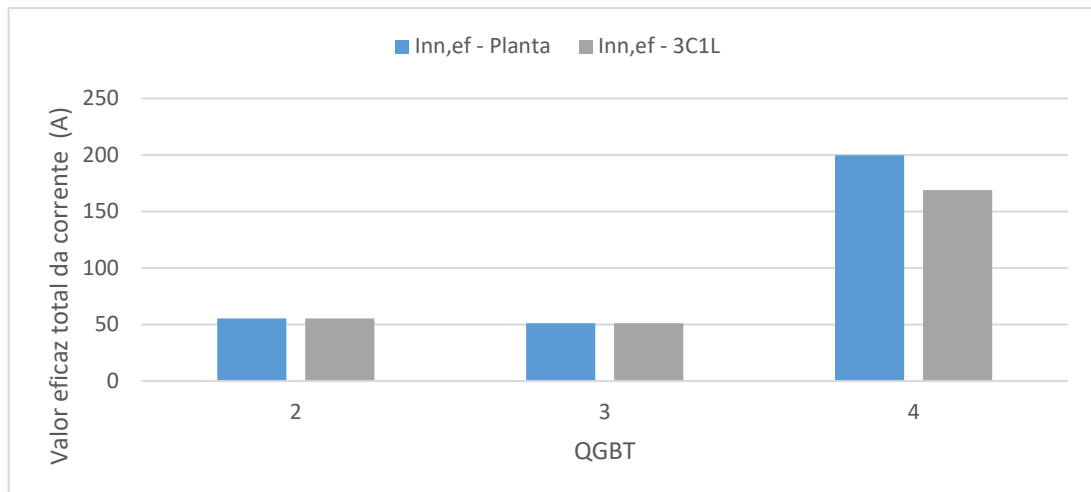
Tabela 44 - Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro em cada QGBT, após a inserção do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado

QGBT	Inn,ef (A)
2	55,40
3	51,13
4	168,80

Fonte: Elaboração própria (2019).

Por último, comparou-se o valor eficaz total no condutor de neutro em cada QGBT, obtidas por meio da modelagem inicial e posteriormente com a inserção do filtro *shunt* 3C1L, de acordo com a Figura 67.

Figura 67 – Valor eficaz total da corrente no condutor de neutro no sistema desequilibrado



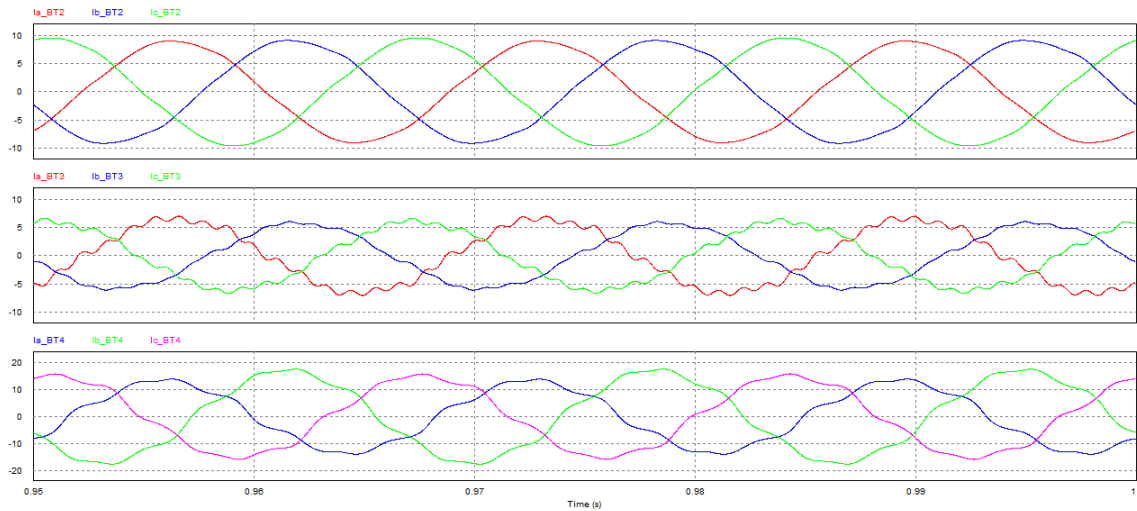
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Observa-se que apesar da redução da componente harmônica de 3ª ordem no QGBT-4 em aproximadamente 92%, a corrente no condutor de neutro é significativa, em função do desequilíbrio das cargas.

4.1.2.2.4 Análise das componentes harmônicas a montante dos transformadores

Através da simulação, verificou-se o comportamento das correntes de linha, vistas a montante dos transformadores, conforme mostra a Figura 68.

Figura 68 – Correntes observadas a montante de cada transformador dos respectivos QGBTs após a inserção do filtro *shunt* 3C1L no sistema desequilibrado



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Em seguida, obtiveram-se os valores da THD_i referente a cada fase dos transformadores, Tabela 45.

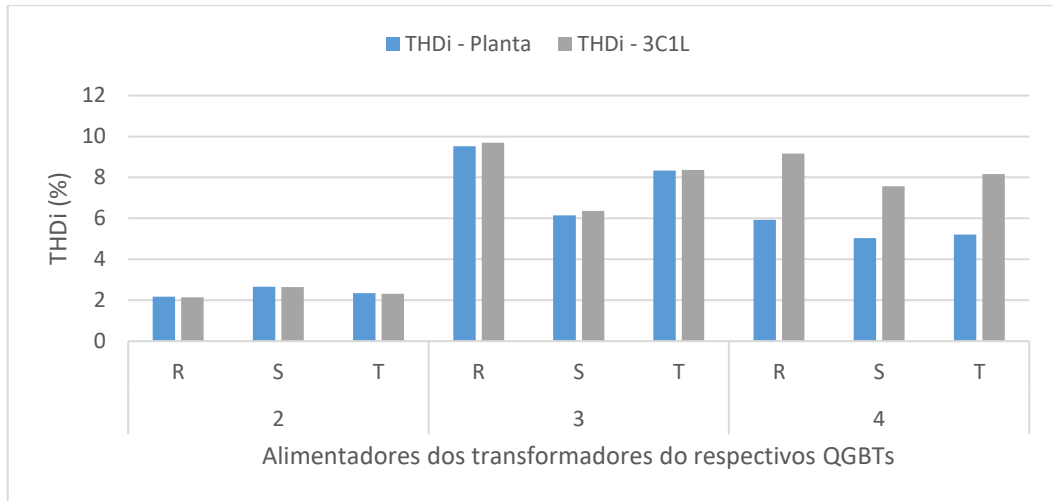
Tabela 45 – THD_i vistas a montante dos transformadores dos QGBTs no sistema desequilibrado obtidas após a inserção do filtro *shunt* 3C1L

QGBT	Fase	THD_i (%)	THD_i (%)
		Modelagem inicial	Filtro <i>shunt</i> 3C1L
2	R	2,17	2,15
	S	2,66	2,64
	T	2,34	2,32
3	R	9,52	9,70
	S	6,15	6,36
	T	8,34	8,36
4	R	5,93	9,17
	S	5,04	7,57
	T	5,20	8,17

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com intuito de avaliar o impacto na THD_i a montante dos transformadores no sistema desequilibrado logo após a inserção do filtro *shunt* 3C1L, confrontaram-se os valores das THD_i s obtidas na modelagem inicial e os valores obtidos depois da conexão do filtro, como demonstra a Figura 69.

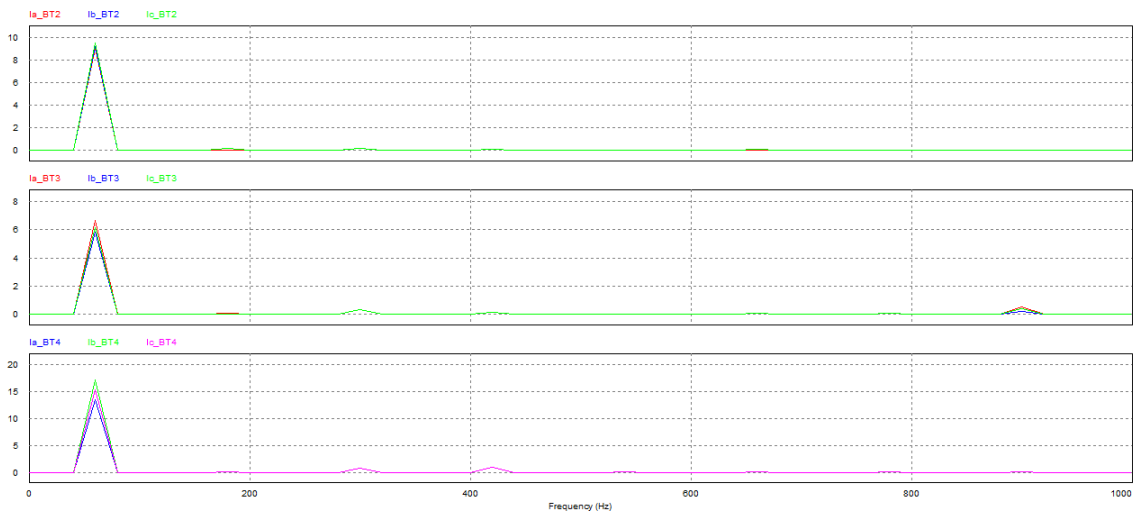
Figura 69 – Medição da THDi a montante dos transformadores no sistema desequilibrado após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Notaram-se que as THDis a montante do QGBT-4 aumentaram em relação a modelagem inicial, portanto recorreu-se ao espectro harmônico das correntes de linha, apresentados na Figura 70.

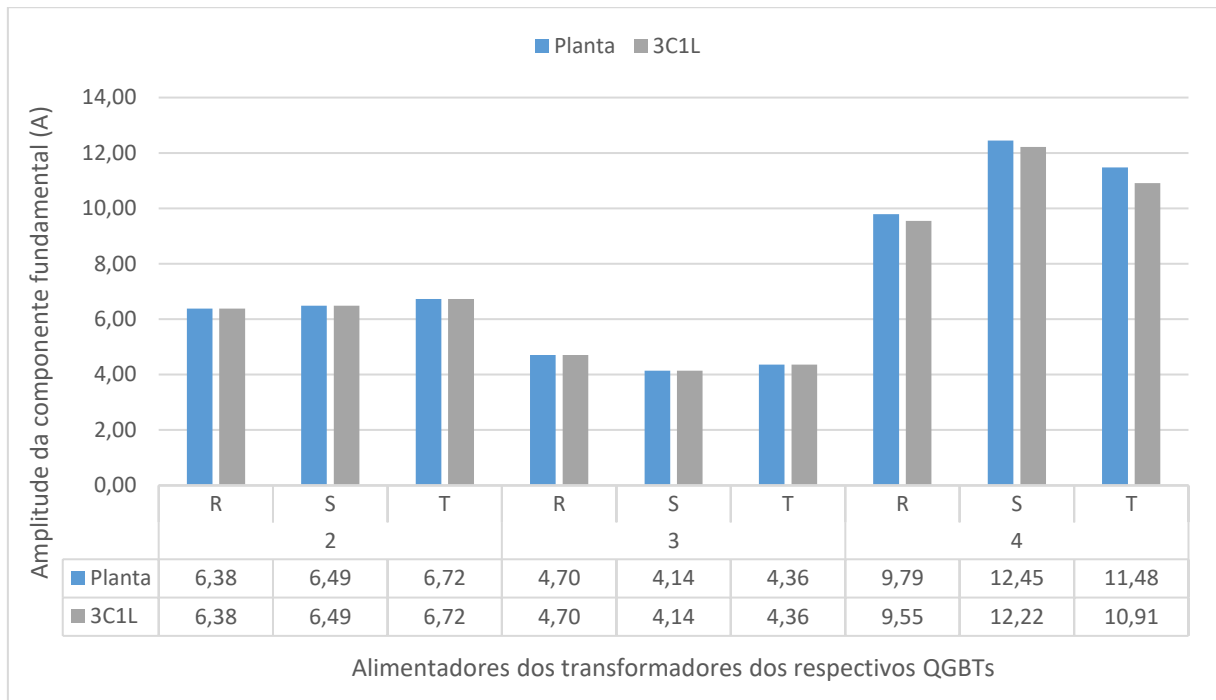
Figura 70 - Espectro harmônico da corrente a montante dos transformadores no sistema desequilibrado após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



Fonte: Elaboração Própria (2019).

Analisando o espectro harmônico, verificou-se a redução do valor da componente fundamental depois da conexão do filtro *shunt* 3C1L, de acordo com a Figura 71.

Figura 71 – Medição da componente fundamental da corrente a montante dos transformadores no sistema desequilibrado após a inserção do filtro *shunt* 3C1L



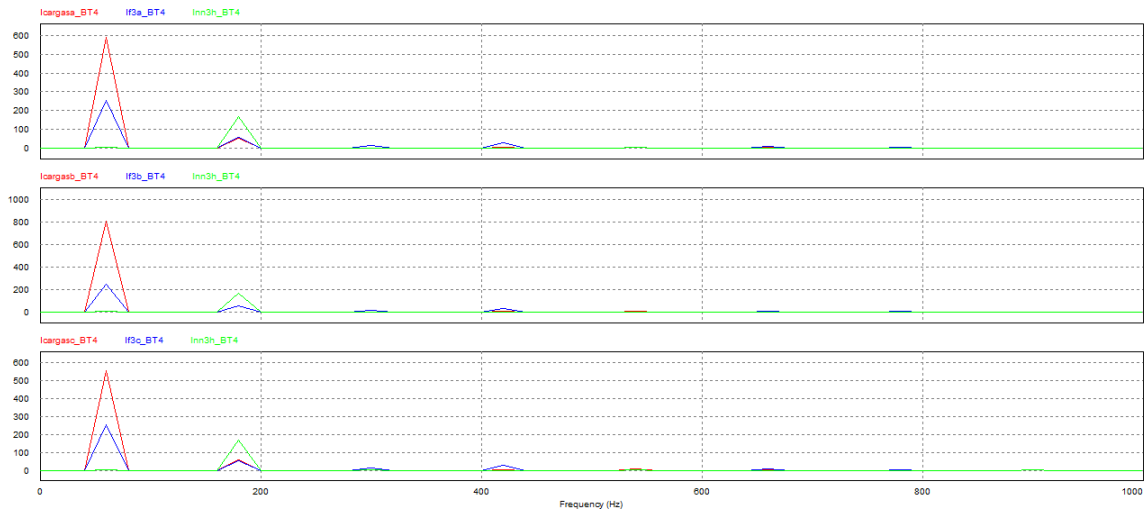
Fonte: Elaboração Própria (2019).

Logo, o aumento da THD_i a montante do QGBT-4 está relacionada com a redução da componente fundamental da corrente, como pode ser deduzido através da Equação (6). Sendo que a redução da componente fundamental ocorre devido a conexão em estrela do banco capacitivo, isto é, o valor da potência reativa capacitiva fornecida pelo filtro com topologia 3C1L é maior que o valor fornecido pelo banco capacitivo conectado em delta, uma vez que são utilizados valores comerciais de unidades capacitivas.

4.1.2.2.5 Desempenho do filtro *shunt* 3C1L

Para analisar a eficiência da filtragem, obteve-se o espectro harmônico da corrente de carga (I_{cargas}) e do filtro *shunt* 3C1L (I_{r3} e I_{m3h}), conforme constata-se na Figura 72.

Figura 72 - Espectro harmônico da corrente na carga, do banco capacitivo trifásico e do reator monofásico do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado

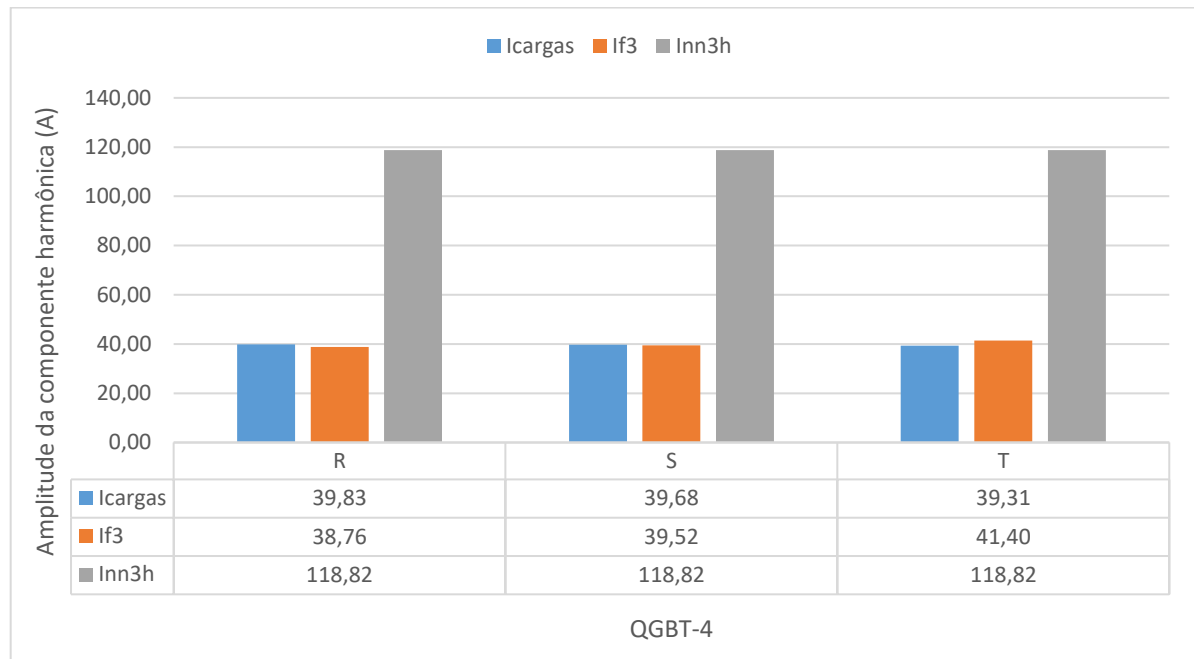


Fonte: Elaboração Própria (2019).

Por meio da FFT, percebeu-se que o banco de capacitores (I_{f3}) do QGBT-4 apresenta praticamente duas parcelas de corrente, uma na frequência de ressonância e outra na frequência fundamental, 60 Hz. Sendo que na frequência da 3ª harmônica, a curva vermelha está praticamente superposta à curva azul, o que indica que o filtro apresenta desempenho adequado.

Ademais, notou-se que o reator monofásico (I_{nn3h}) apresenta somente uma parcela de corrente, que corresponde ao somatório das harmônicas de terceira ordem que percorrem o banco de capacitores do filtro *shunt* 3C1L.

Na Figura 73, analisa-se a amplitude da corrente harmônica de 3ª ordem no sistema desequilibrado correspondente a carga e ao filtro *shunt* 3C1L, onde apenas uma pequena parcela da componente de terceira harmônica não percorre o filtro *shunt* 3C1L, devido a não-idealidade do indutor do filtro.

Figura 73 – Desempenho do filtro *shunt* 3C1L no sistema desequilibrado

Fonte: Elaboração Própria (2019).

4.1.2.2.6 Análise dos dados mediante a recomendação da IEEE Std 519-2014

Com os dados obtidos das amplitudes das componentes harmônicas após a conexão do filtro *shunt* 3C1L, avaliou-se a distorção harmônica da corrente em cada QGBT, adotando a recomendação da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014).

Os limites das componentes harmônicas de corrente de ordem ímpar para sistemas com tensão de 120 V a 69 kV dependem do parâmetro I_{sc}/I_L , sendo I_{sc} a corrente de curto-circuito obtida de acordo com as Equações (10), (11) e (12).

Os valores das correntes de curto-circuito nos QGBTs e as grandezas necessárias para calcular a faixa I_{sc}/I_L , admitindo a corrente máxima demandada pela carga na componente de frequência fundamental (I_L) igual a corrente medida no alimentador (I_{sef}), constam na Tabela 46.

Tabela 46 –Parâmetro I_{sc}/I_L após a inserção do filtro *shunt* 3C1L para o sistema desequilibrado

QGBT	Z_B (m Ω)	Z_{pu} (%)	Z_{trafo} (m Ω)	I_{sc} (kA)	I_L (A)	I_{sc}/I_L
2	288,80	5,83	16,84	13,06	238,63	54,73
					246,42	53,00
					226,69	57,61
3	288,80	7,30	21,08	10,44	169,42	77,09
					136,93	76,24
					174,51	59,82
4	288,80	7,30	21,08	10,44	354,44	29,45
					497,14	21,00
					333,87	31,27

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os dados medidos na simulação, calculou-se para cada fase dos QGBTs o maior valor percentil medido entre harmônicas de cada faixa e o valor da TDD, conforme mostrado na Tabela 47.

Tabela 47 – Valores percentuais das componentes harmônicas das correntes e da TDD após a inserção do filtro *shunt* 3C1L no sistema desequilibrado

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%	6,2%	0,0%	0,0%	0,0%	8,7%
	8,3%	2,3%	0,0%	0,0%	0,0%	10,6%
	6,5%	7,7%	0,0%	0,0%	0,0%	11,5%
4	7,2%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	9,3%
	5,2%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	6,8%
	7,4%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%	9,4%

Fonte: Elaboração própria (2019).

Os valores percentis no QGBT-2 e QGBT-3 devem ser avaliados para o parâmetro I_{sc}/I_L entre 50 e 100, contudo no caso do QGBT-4 os limites estão associados a faixa I_{sc}/I_L entre 20 e 50.

A partir da análise dos dados, percebeu-se que o QGBT-2 respeita os limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014). Por outro lado, o QGBT-3 extrapola em duas fases o limite de 4,5% para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre 11 e 17. Ademais, o QGBT-4 excede em duas fases o limite de 8% da TDD e o limite de 7% para as componentes harmônicas de ordem ímpar entre 3 e 11.

Portanto, constatou-se que a inserção do filtro *shunt* 3C1L acarretou em um aumento da componente harmônica de 7ª ordem, que colaborou de maneira significativa com o aumento das componentes harmônicas de ordem ímpar entre 3 e 11.

Dessa forma, somente a filtragem da harmônica de 3ª ordem no QGBT-4 não foi o suficiente para atender as recomendações da IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014).

5 CONCLUSÃO

Por meio do estudo realizado, verificou-se que no sistema equilibrado o modelo proposto e as medições no PCC, apresentam resultados satisfatórios da taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase dos QGBTs, validando desta maneira o modelo. Além disso, notou-se que no sistema equilibrado a corrente do condutor de neutro de cada QGBT está relacionada com a presença de harmônicas homopolares, com maior influência da componente de terceira harmônica.

Após a conexão do filtro *shunt* 3C1L no sistema equilibrado, observou-se que a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase do QGBT-4 apresentou uma redução de aproximadamente 22%, devido a filtragem da componente harmônica de 3ª ordem. Ademais, a filtragem da componente homopolar acarretou na redução do valor eficaz total da corrente no condutor de neutro, de 113,58 A para 13,67 A.

Para o sistema trifásico desequilibrado a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase dos QGBTs apresenta valores aproximados entre o modelo proposto e as medições no PCC, quer dizer, o modelo proposto reproduziu de maneira satisfatória a planta elétrica do sistema real.

Com a inserção do filtro *shunt* 3C1L no sistema real, reparou-se que a taxa de distorção harmônica da corrente para cada fase do QGBT-4 apresenta uma redução entre 18% e 27% em relação a planta elétrica modelada, em virtude da filtragem da componente harmônica de 3ª ordem. Acrescenta-se que devido ao desequilíbrio entre as correntes de fase, as correntes harmônicas *triplens* circulam a montante dos transformadores.

Além disso, percebeu-se que no sistema real o valor eficaz total da corrente no condutor de neutro do QGBT-4 foi reduzido de 199,78 A para 168,80 A, ou seja, apesar da redução da componente harmônica de 3ª ordem em aproximadamente 92%, a corrente no condutor de neutro continua significativa, em razão do aparecimento da componente harmônica na frequência fundamental, ocasionada pelo desequilíbrio entre as correntes de fase.

Com base nos resultados obtidos para as três situações de carga típica, observou-se que o caminho de baixa impedância criado pelo filtro *shunt* 3C1L no QGBT-4 não afetou a TDD nos demais QGBTs. Desta maneira, pode-se afirmar que

o projeto da célula de filtragem se torna mais simples, uma vez que a instalação elétrica não afeta o sistema da concessionária, isto é, não ocorre o fluxo de componentes harmônicas entre as instalações elétricas vizinhas.

Por fim, constatou-se que o sistema equilibrado apresenta os melhores resultados em relação aos limites recomendados pela IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014), e conseqüentemente na redução do valor eficaz total da corrente no condutor de neutro, em outras palavras, o equilíbrio das correntes nas fases contribui de maneira significativa para redução da corrente no condutor de neutro.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria interessante analisar a implementação de um filtro *shunt* tradicional no QGBT-4, a fim de avaliar ambas as unidades de filtragem e investigar o surgimento da componente harmônica de 7ª ordem.

Outra abordagem possível de ser realizada em trabalhos futuros é projetar seções de filtragem com base no perfil de consumo, com intuito de obter um projeto que responda a variação de carga, ou seja, a cada acréscimo ou decréscimo de carga são corrigidos a distorção harmônica da corrente e o fator de deslocamento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. **Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica**. 10. Ed. Jan., 2018.

ALMEIDA, M.S. **Elaboração de projeto, TCC, dissertação e tese: uma abordagem simples, prática e objetiva**. São Paulo: Atlas, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformadores de potência - Parte 11: Transformadores do tipo seco - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.

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.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)**: Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Jun., 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, Efeitos e Soluções**. São Paulo, 2001.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA. Ministério da Educação. **Tomada de preço Nº 18/2019**: Execução dos Serviços de Reestruturação da Subestação de Energia Elétrica do IF-SC Campus de Florianópolis. 16 dez. 2009. Disponível em: <<https://caco.ifsc.edu.br/images/stories/file/TP182009subestacaoFpolis.pdf>>. Acesso em 12 mar. 2019.

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.

MCLYMAN, C. WM. T. **Transformer and Inductor Design: Third Edition, Revised and Expanded**. California: Marcel Dekker, 2004.

NERY, A; HOPNER, F. **Análise de Distorções Harmônicas em Planta Industrial Modelada por Fontes de Corrente**. 2016. 118f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

OLIVEIRA, R. H. **Estudo da Viabilidade da Utilização de Filtros Passivos na Filtragem de 3ª Harmônica de Corrente em Transformadores de Distribuição**. 2010. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

PEREIRA, O. O. **Estudo da Distorção Harmônica em Um Sistema Trifásico de Baixa Tensão**. 1999. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PSIM: **Software de Simulação de Circuitos Elétricos**. Versão 9.0.3.400. [S. l.]: POWERSIMTECH, 2010. 1 CD.

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.

SCHWARZ, J. **Estudo de Proposta para Redução de Conteúdo Harmônico em Uma Planta Industrial**. 2006. 112 f. Trabalho de Especialização - Universidade Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2006.

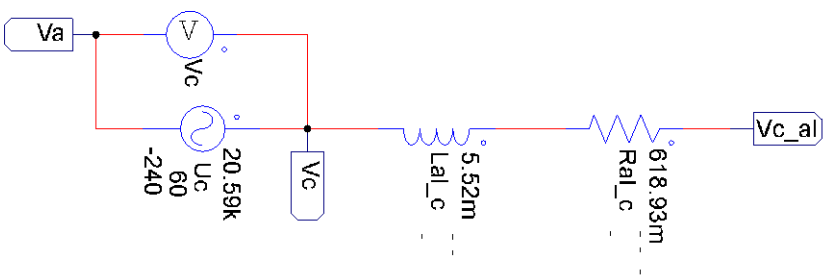
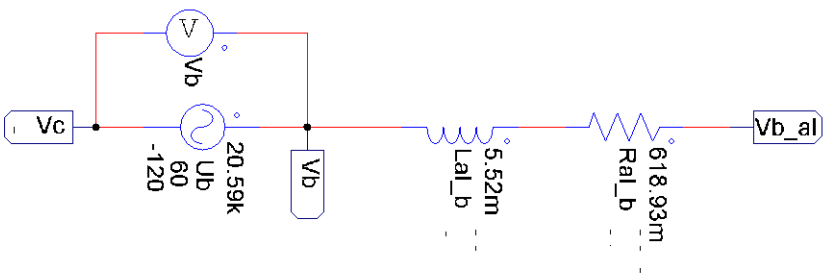
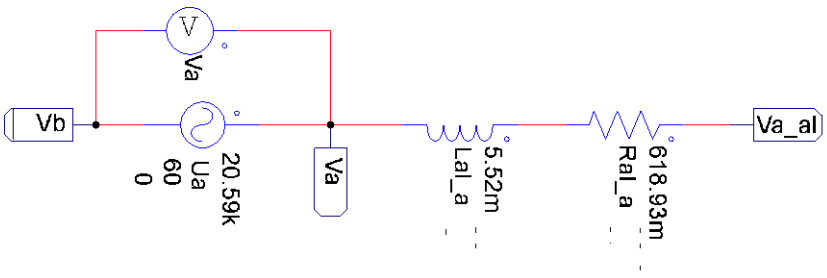
SOLIDWORKS: **Software de CAD 3D**. Versão 2017. [S. l.]: Dassault Systèmes S.A., 1995. 1 CD.

POWERSIMTECH. **PSIM - Software de Simulação de Circuitos Elétricos**. Versão 9.0.3.400, 2010.

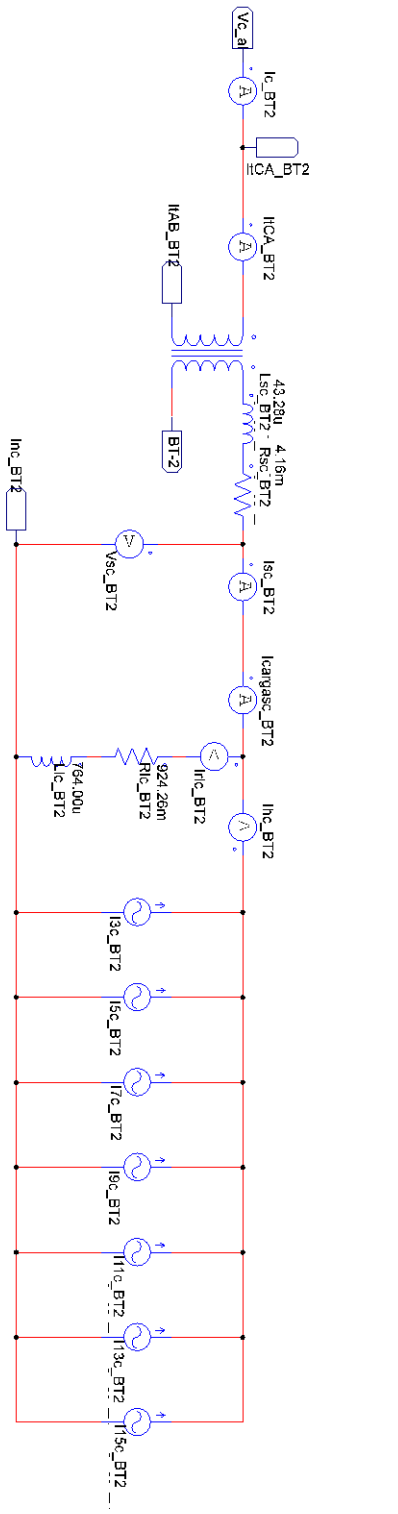
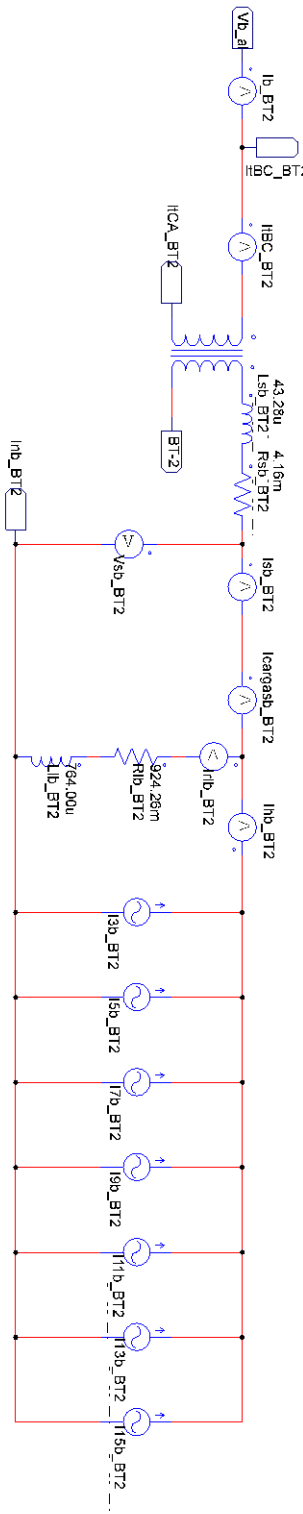
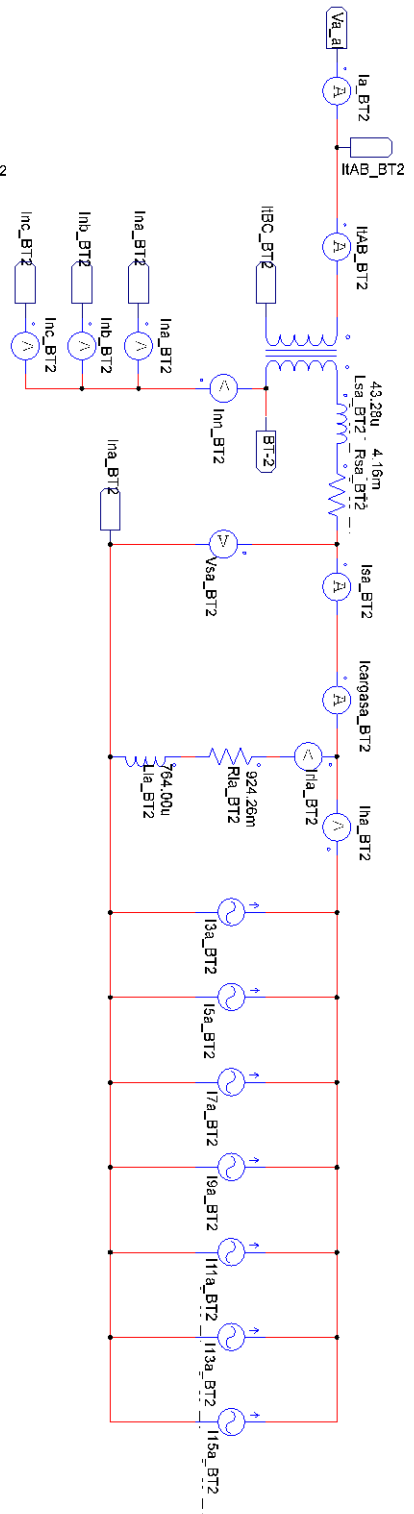
TEIXEIRA, D. A. **Análise das Distorções Harmônicas – Estudo de Caso de Um Sistema Industrial**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2009.

APÊNDICE A – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA COMERCIAL

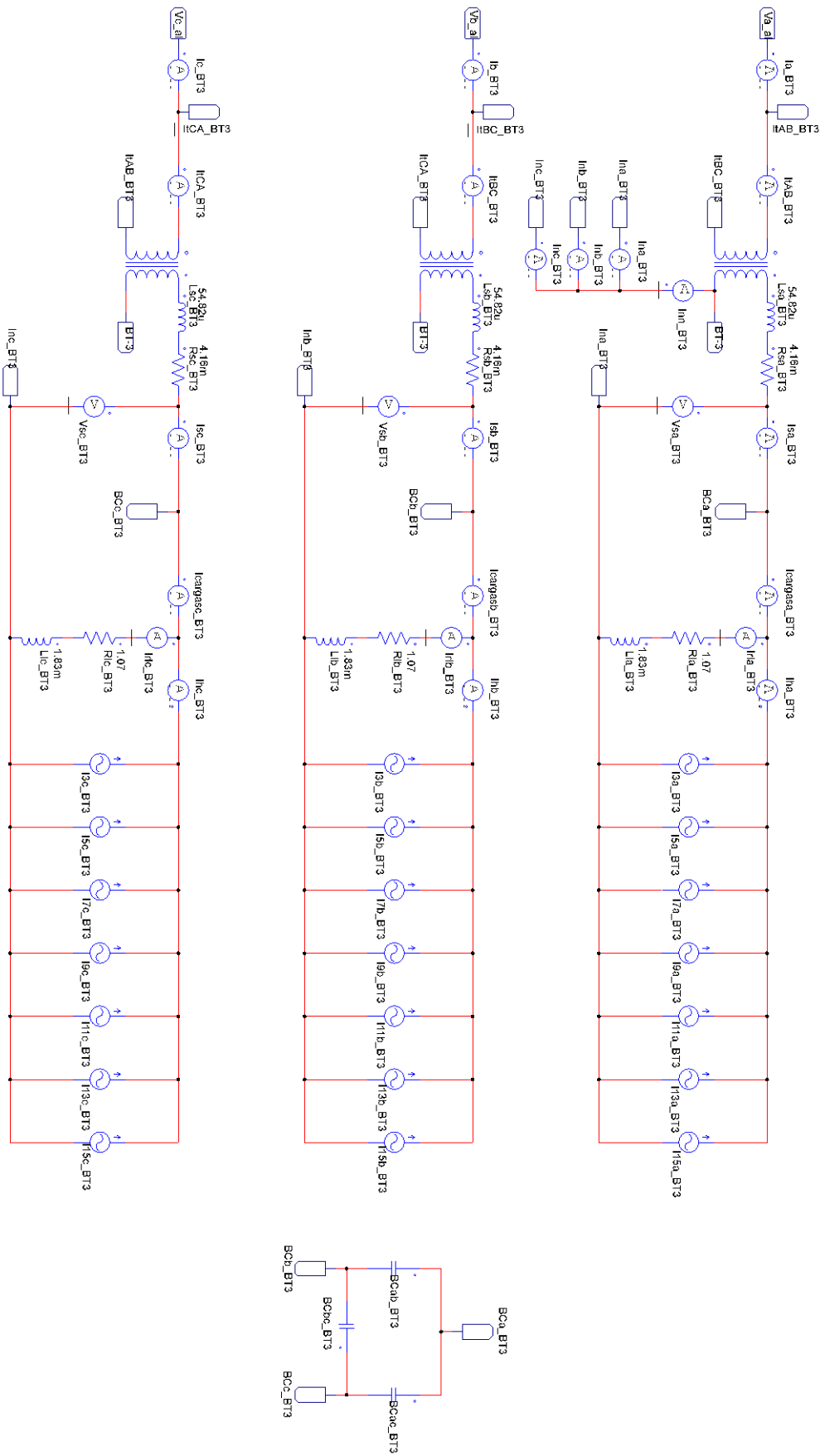
Tensão de alimentação



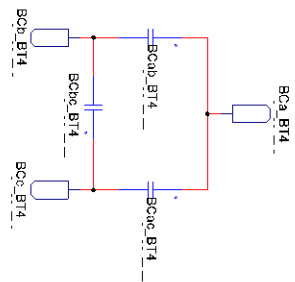
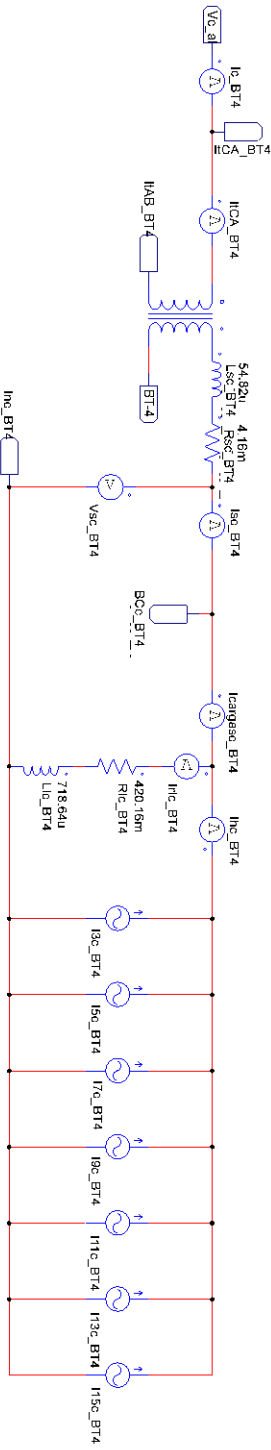
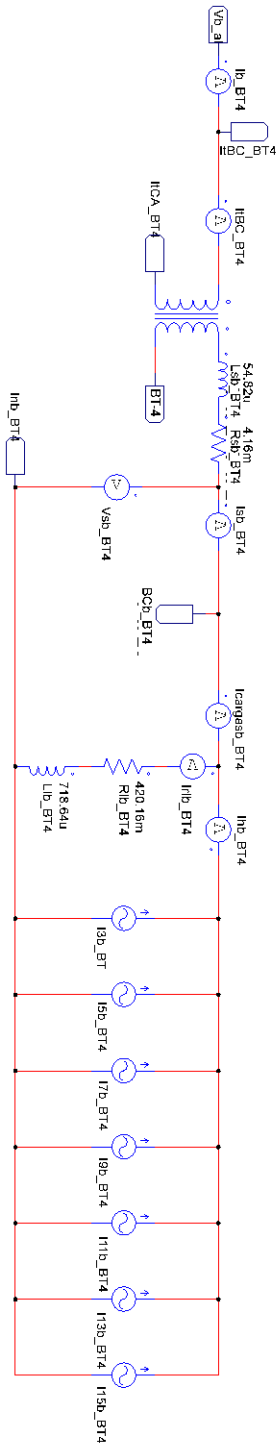
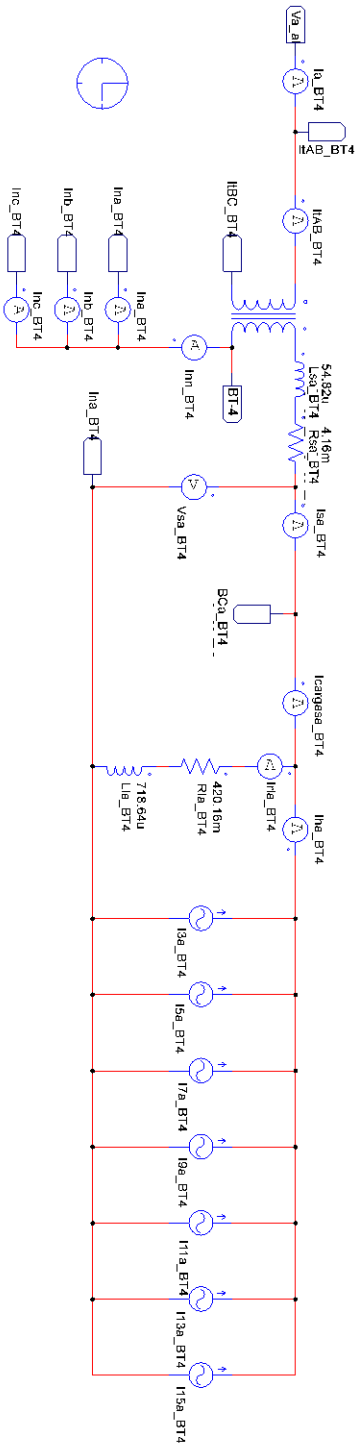
QGBT-2



QGBT-3

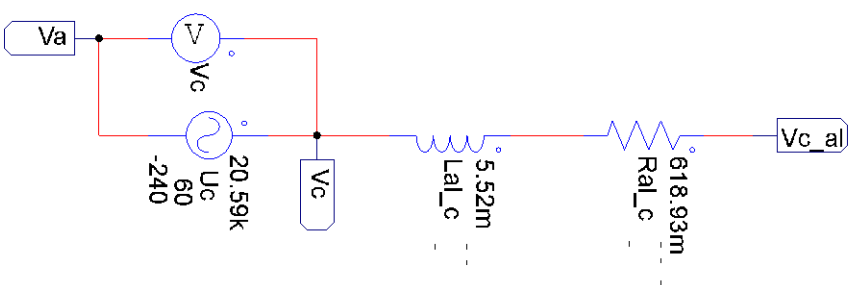
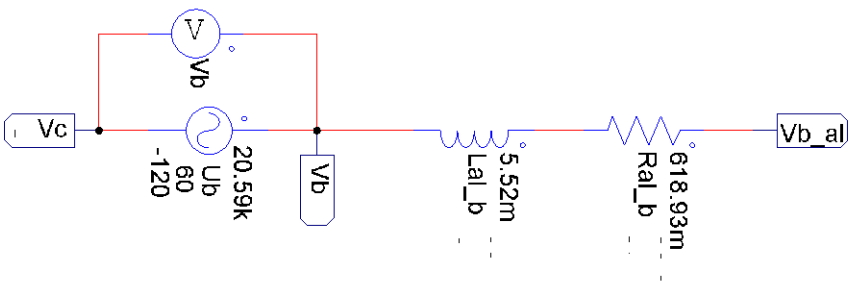
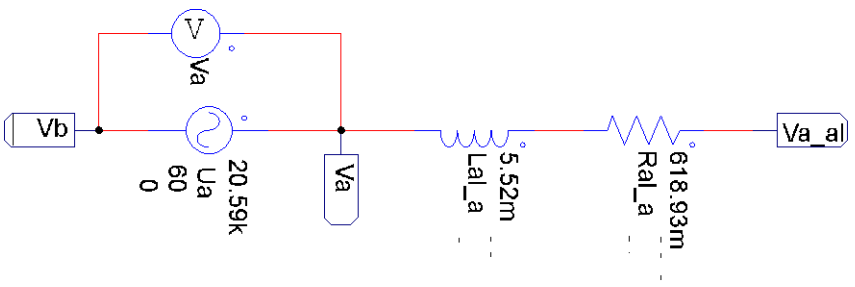


QGBT-4

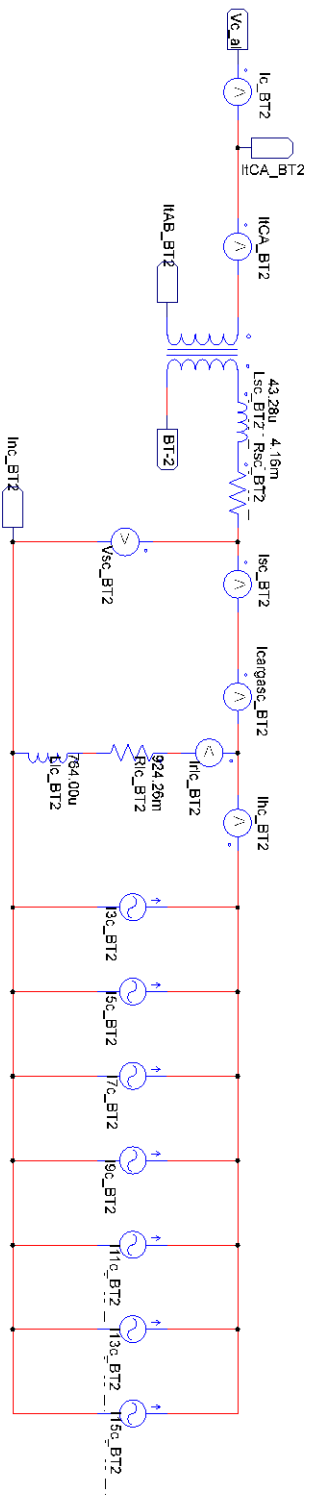
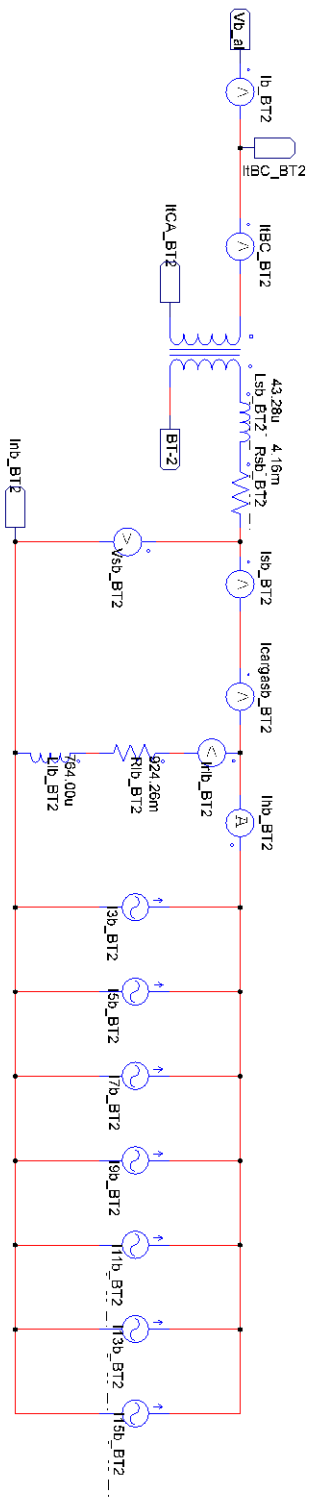
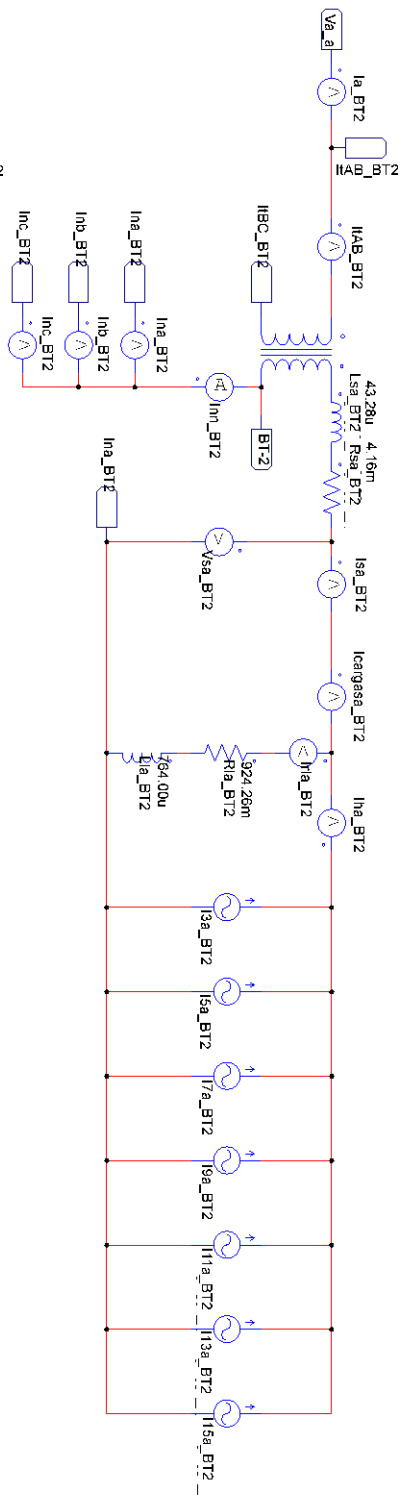


**APÊNDICE B – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA COMERCIAL
COM O FILTRO *SHUNT* 3C1L**

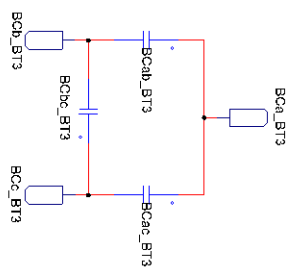
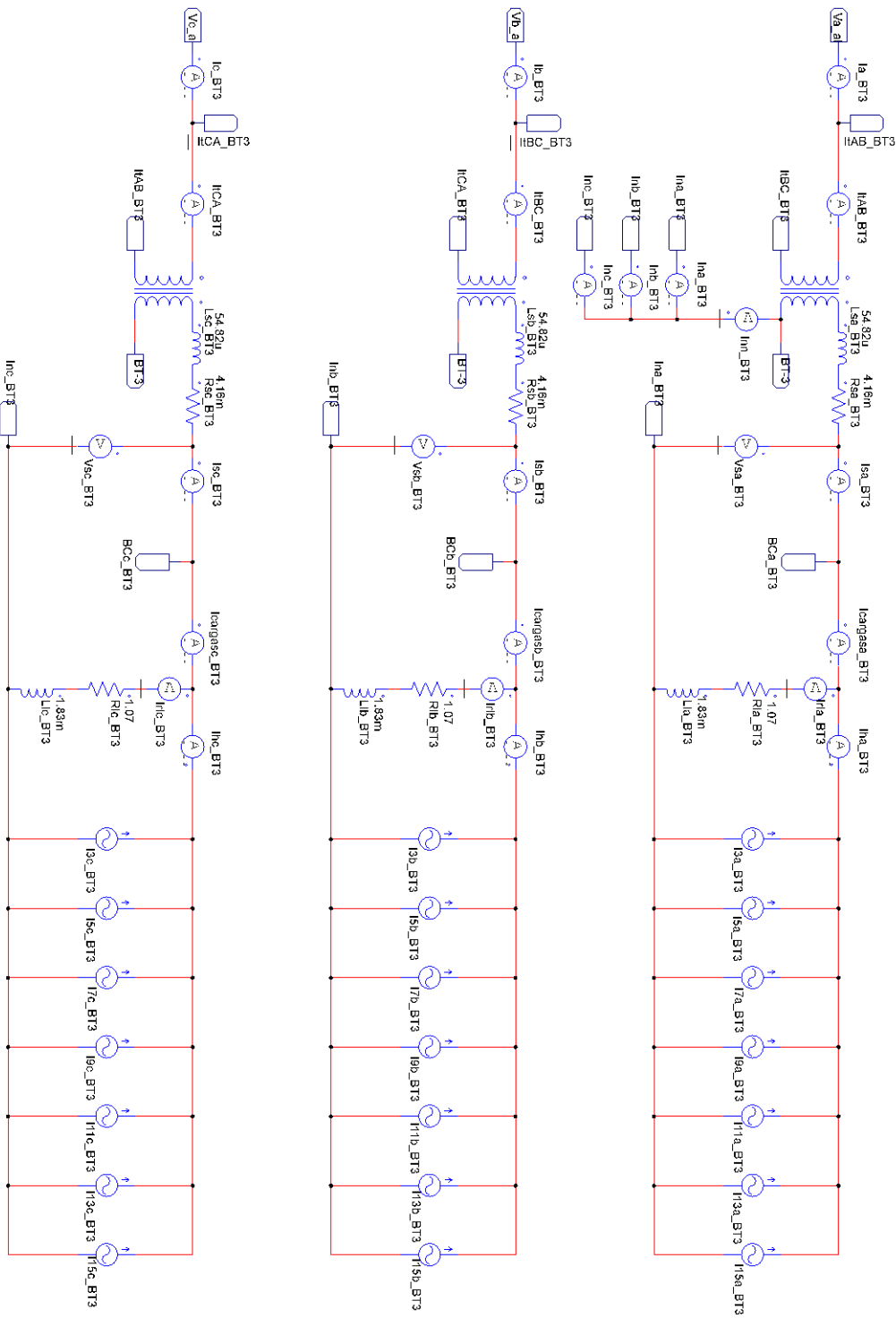
Tensão de alimentação



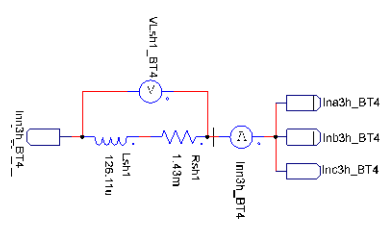
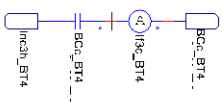
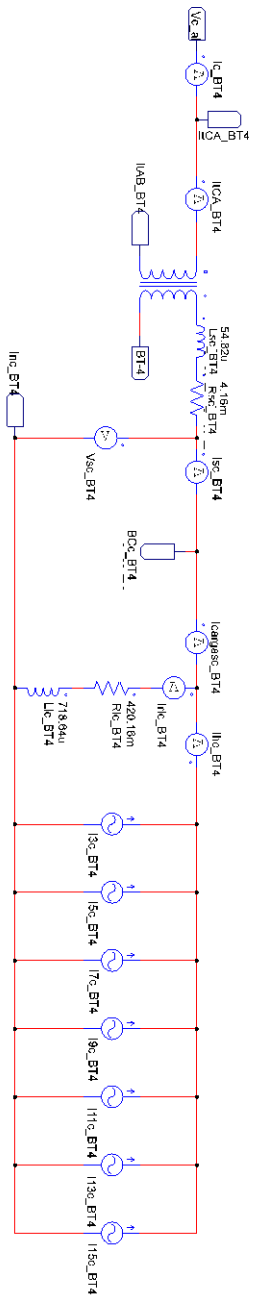
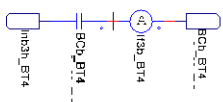
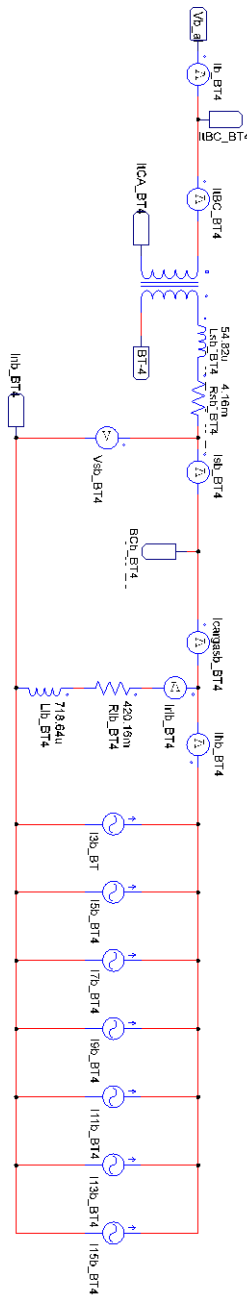
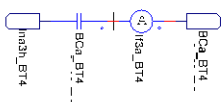
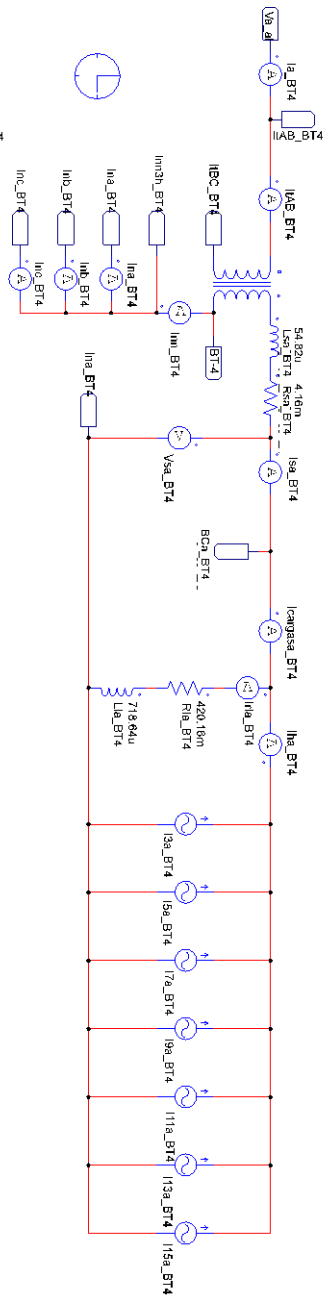
QGBT-2



QGBT-3

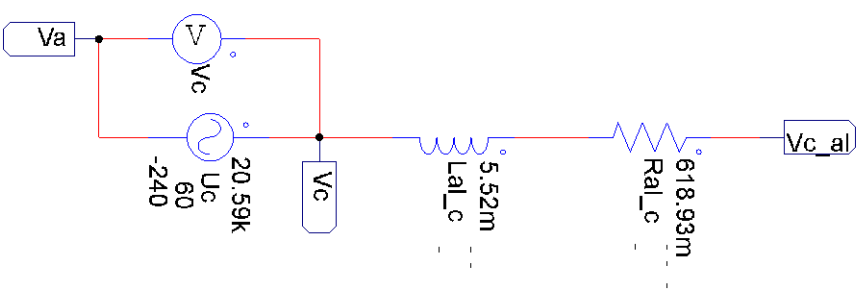
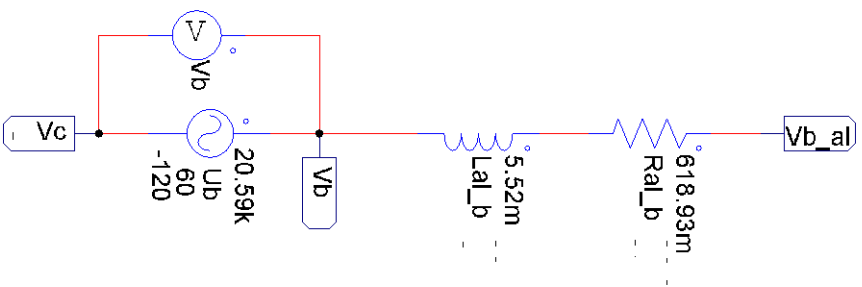
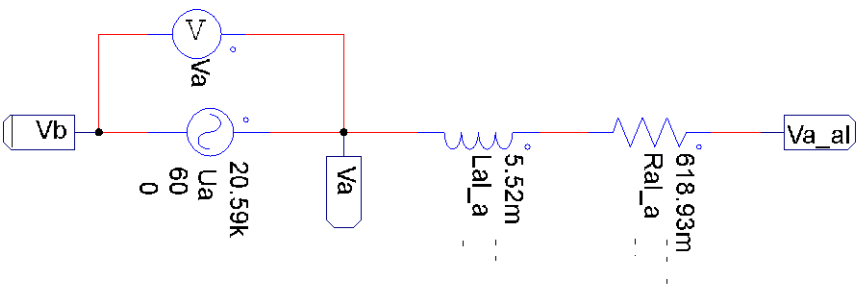


QGBT-4

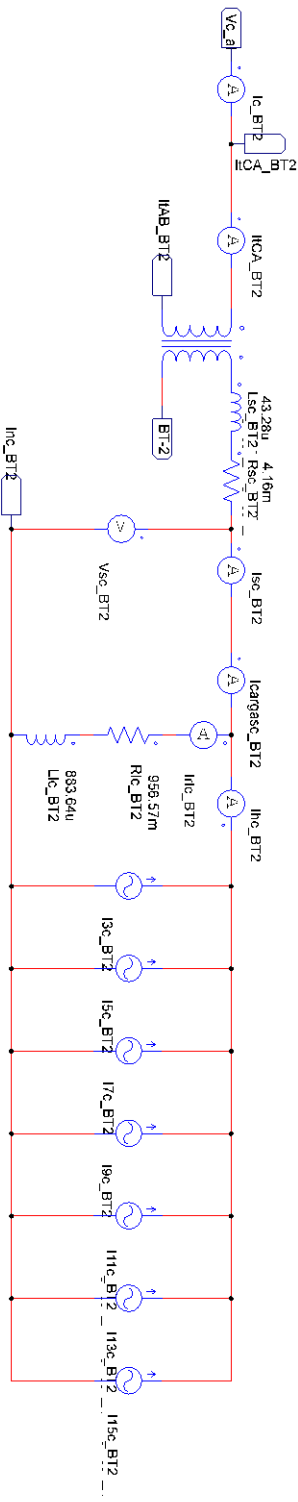
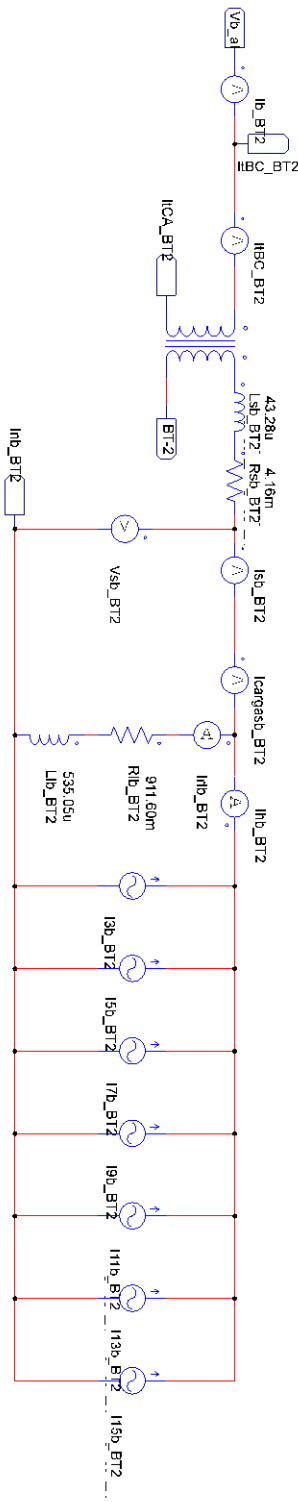
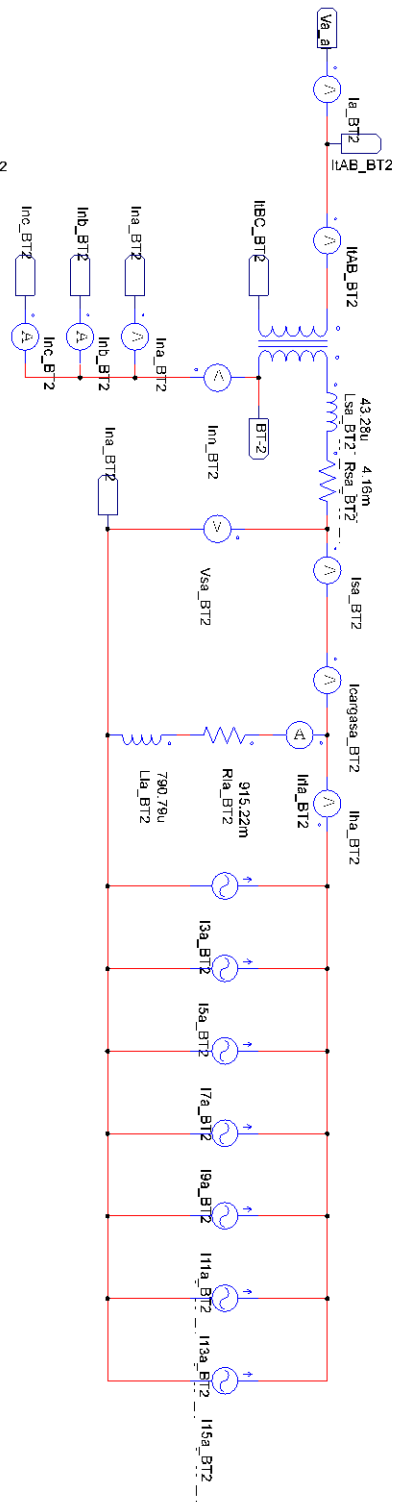


**APÊNDICE C – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA PARA O
SISTEMA DESEQUILIBRADO**

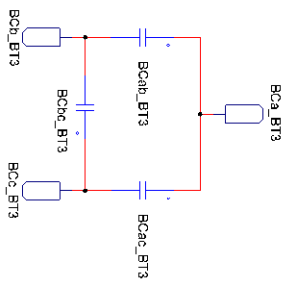
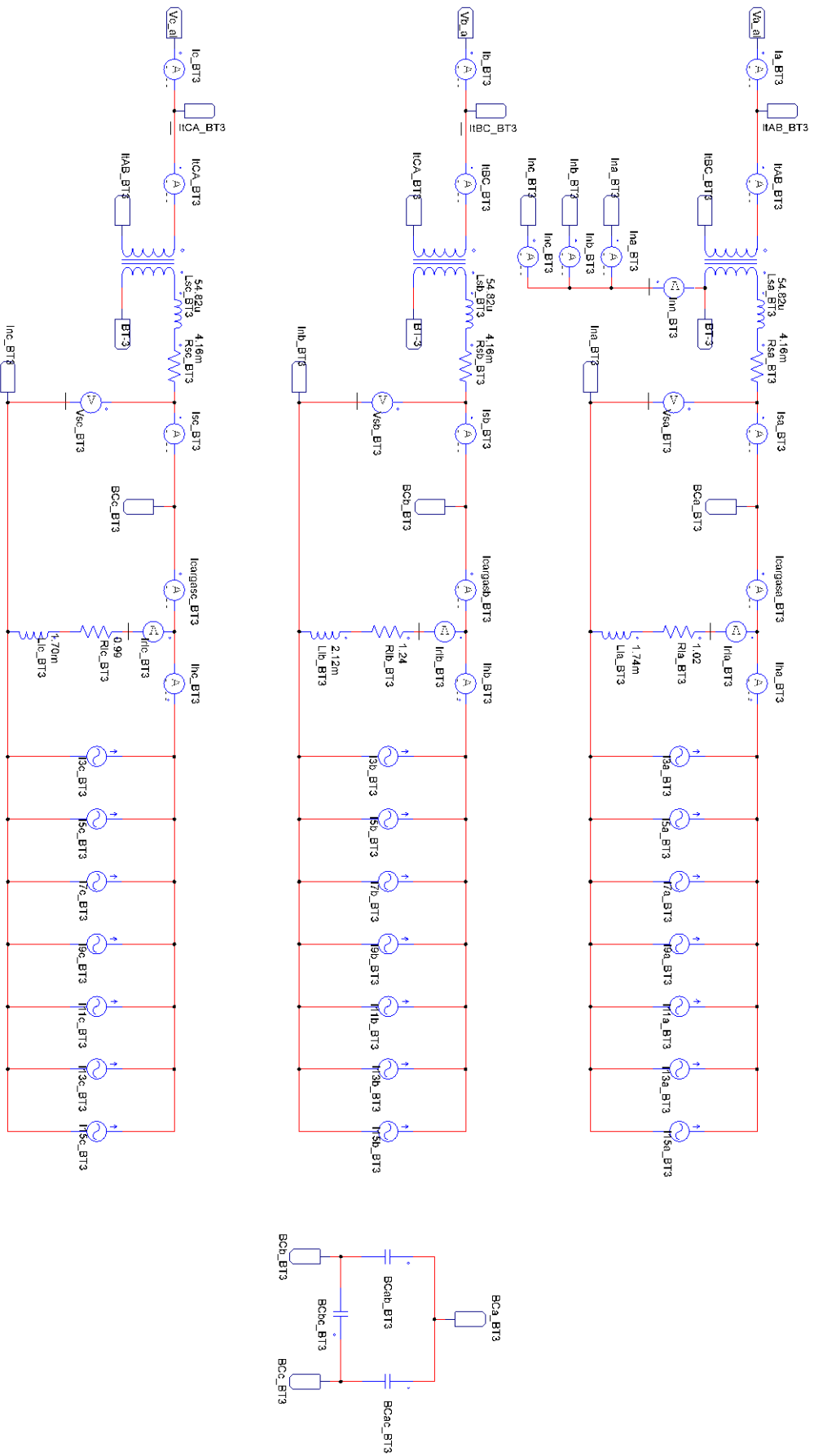
Tensão de alimentação



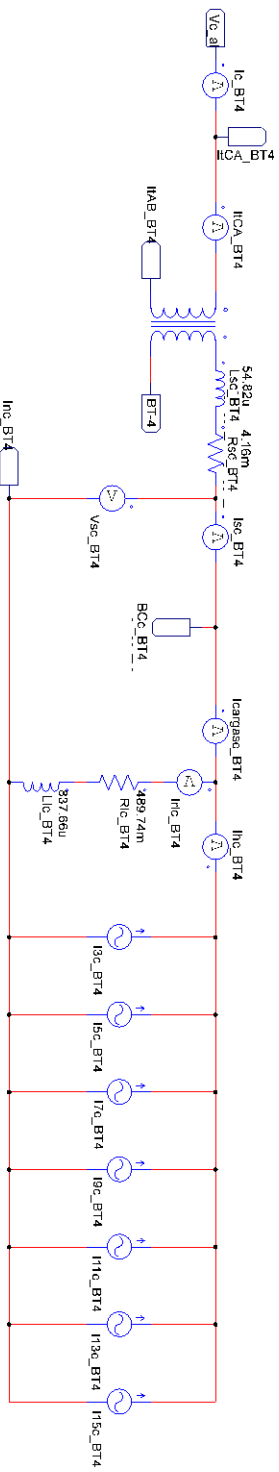
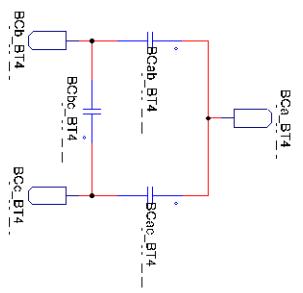
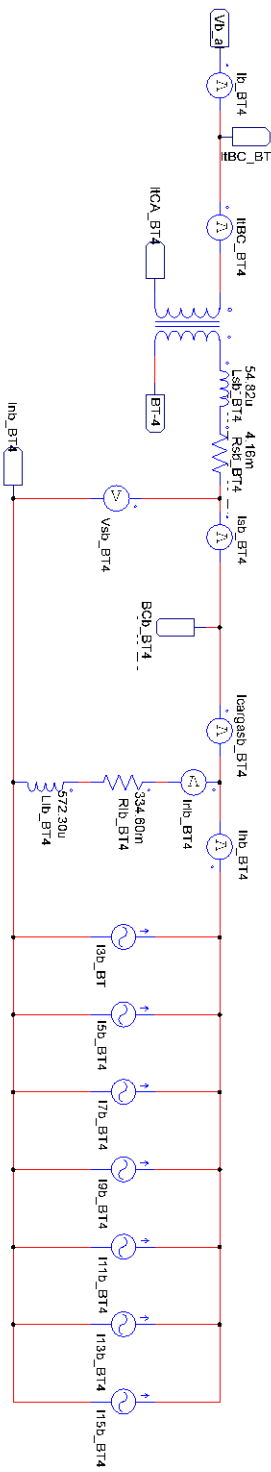
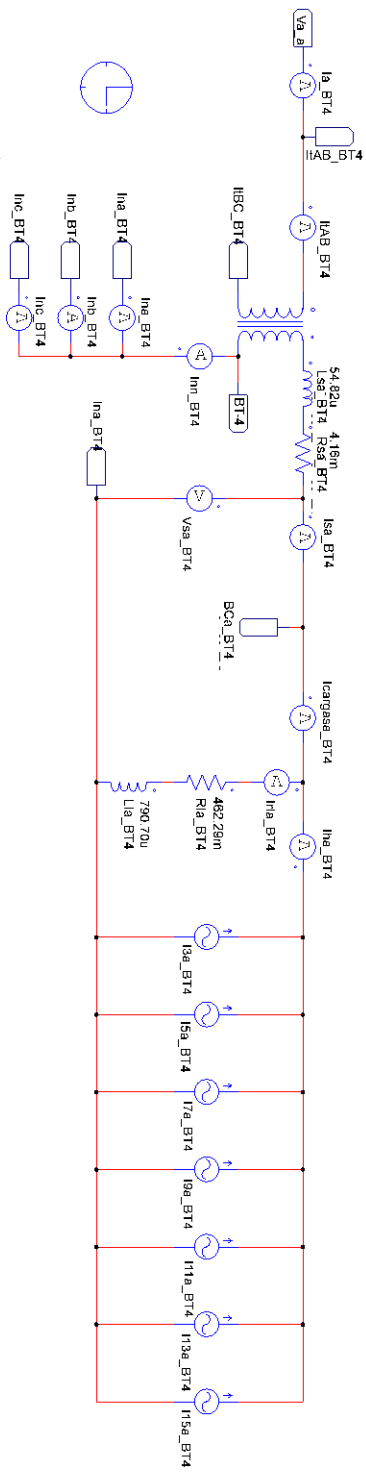
QGBT-2



QGBT-3

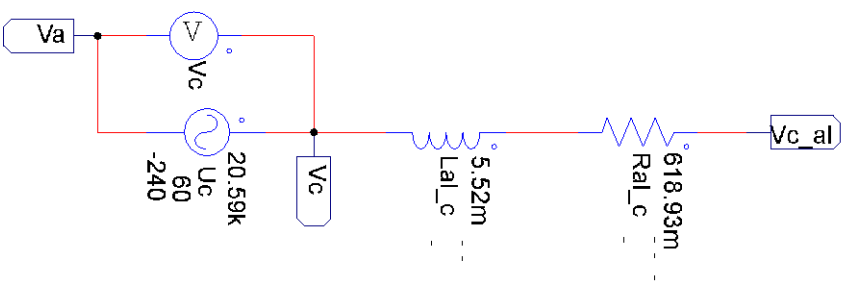
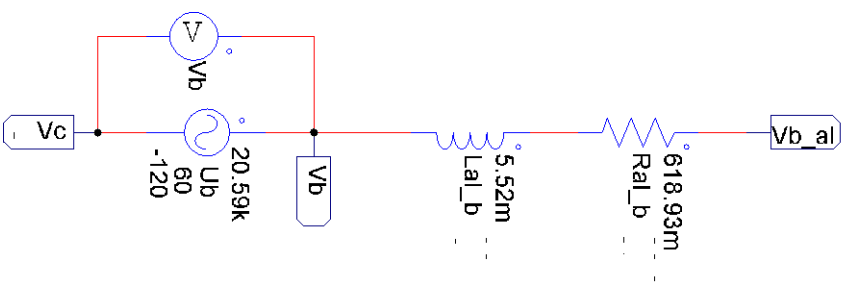
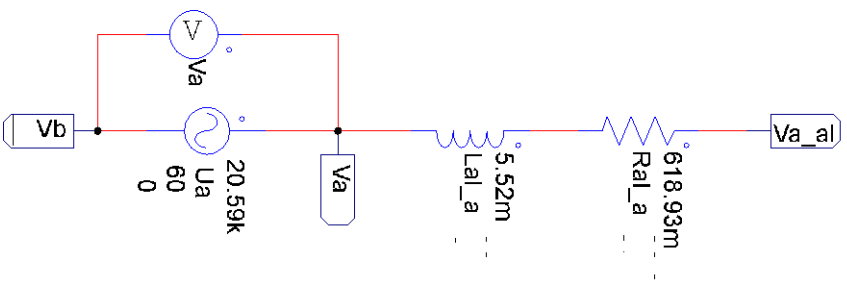


QGBT-4

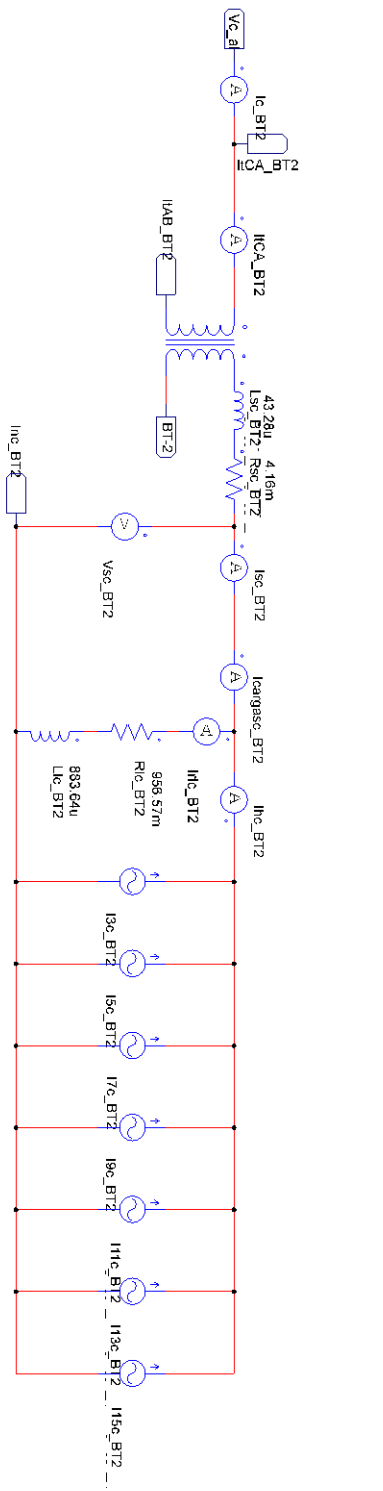
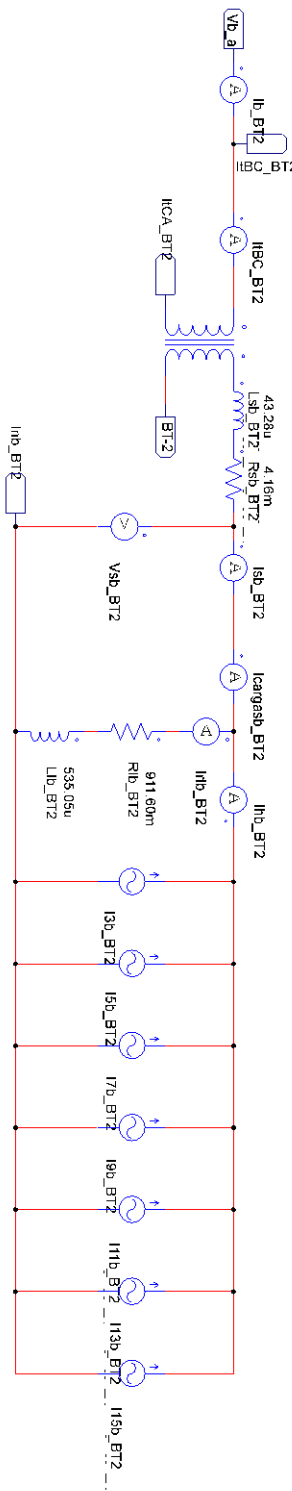
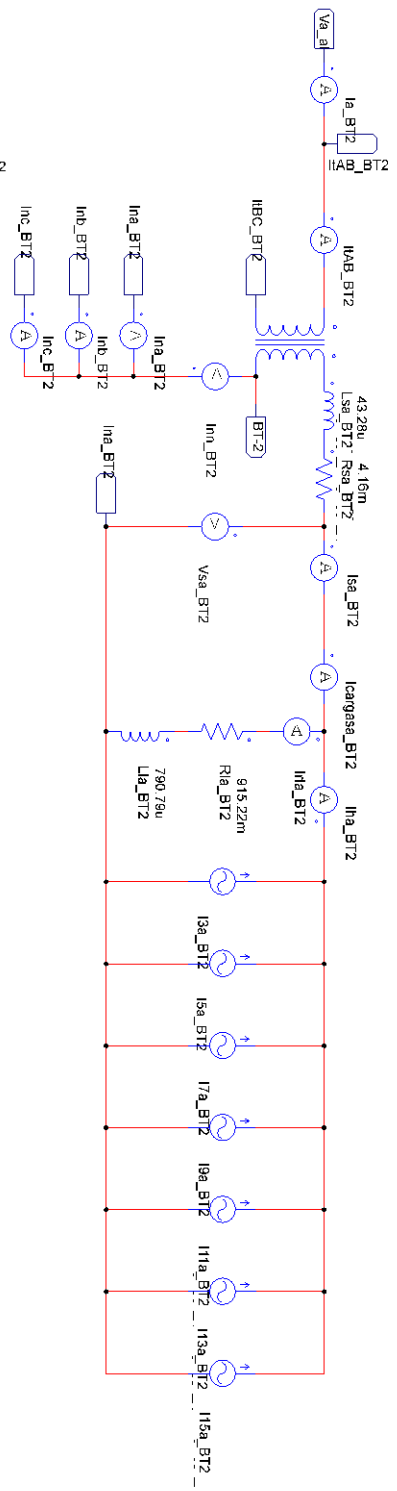


**APÊNDICE D – MODELAGEM DA PLANTA ELÉTRICA COMERCIAL
COM O FILTRO *SHUNT* 3C1L PARA O SISTEMA DESEQUILIBRADO**

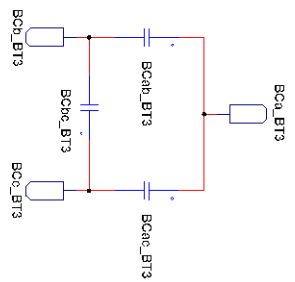
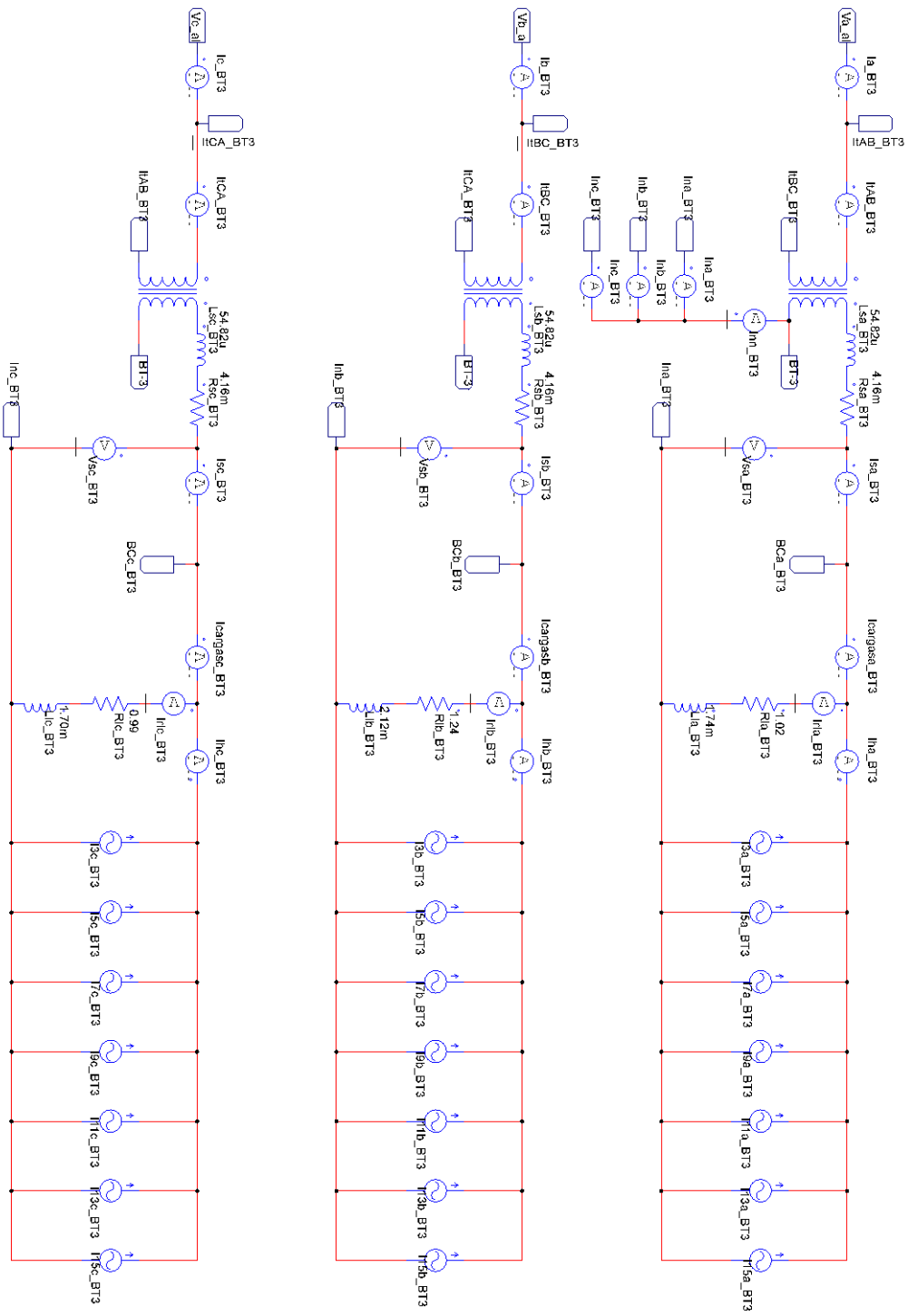
Tensão de alimentação



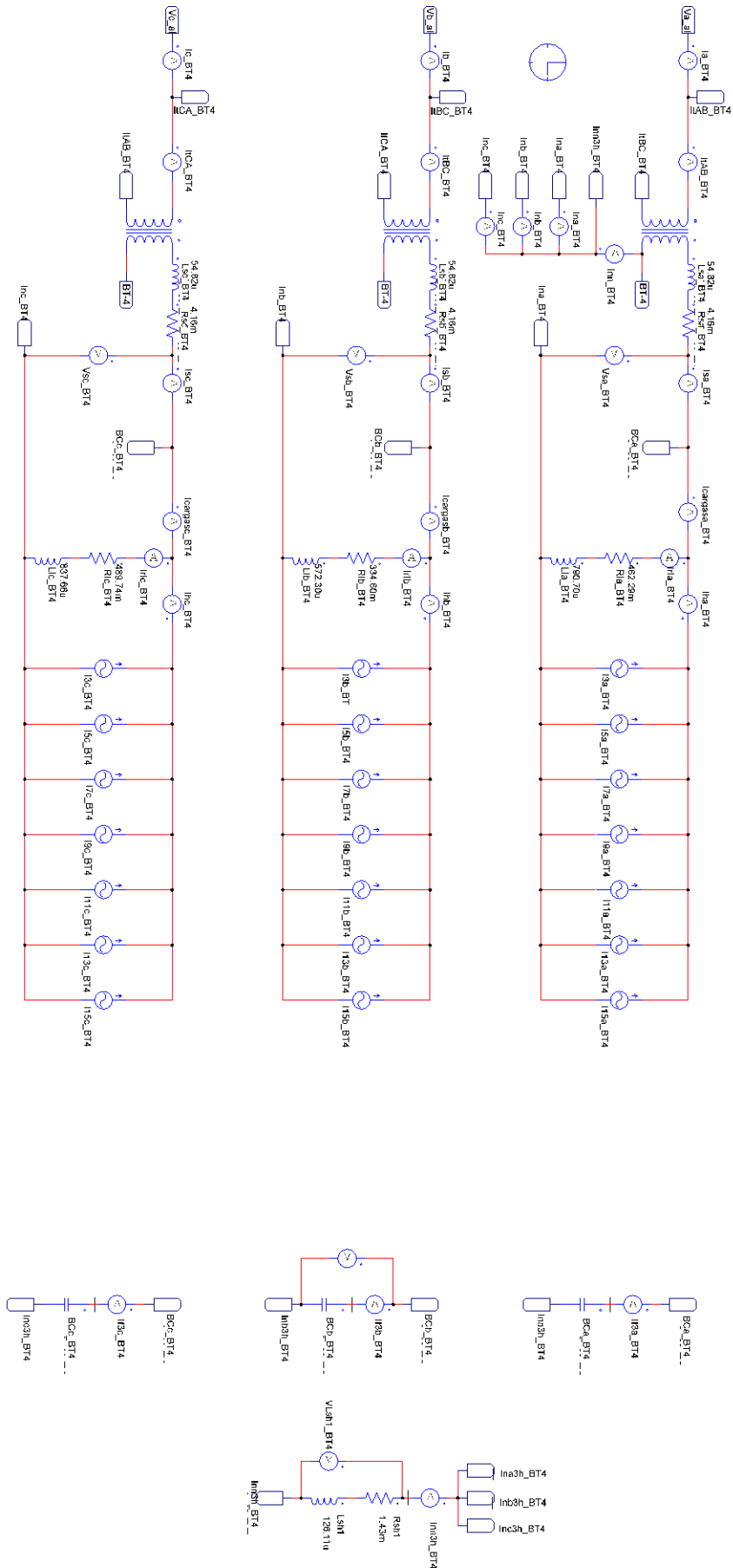
QGBT-2



QGBT-3



QGBT-4



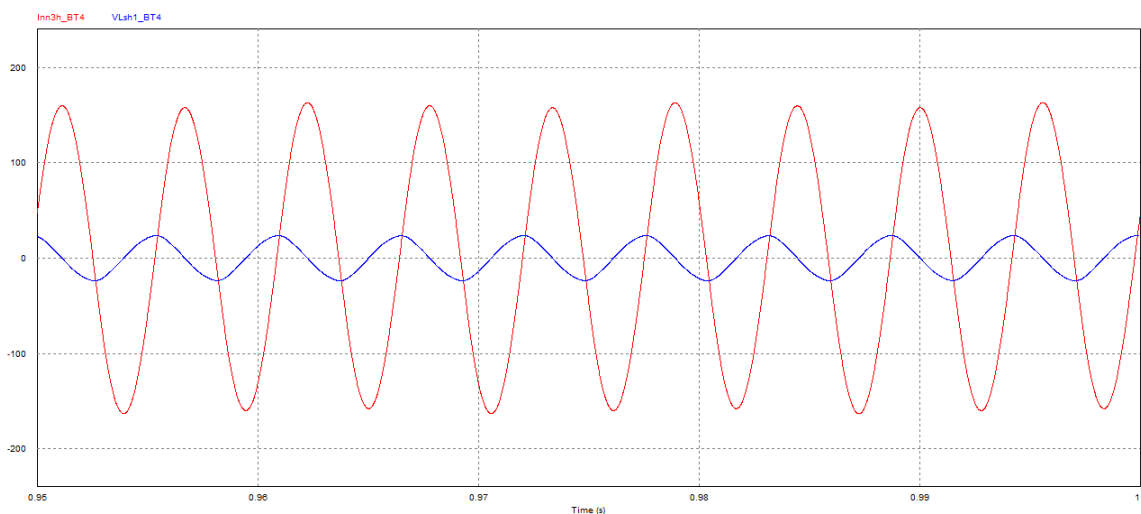
APÊNDICE E – PROJETO FÍSICO DO FILTRO *SHUNT* 3C1L

E.1 PROJETO FÍSICO DO FILTRO SHUNT 3C1L

E.1.1 REATOR MONOFÁSICO

Para realizar o projeto físico do reator monofásico, avaliaram-se as componentes de tensão e corrente, medidas pelo voltímetro (V_{Lsh1_BT4}) e amperímetro (I_{lnn3h_BT4}), conforme apresentado na Figura 74.

Figura 74 - Tensão e corrente no reator monofásico



Fonte: Elaboração própria (2019).

Posteriormente, mediram-se os valores das grandezas referentes ao indutor monofásico, os valores medidos constam na Tabela 48.

Tabela 48 – Medições dos valores das grandezas referentes ao indutor monofásico

QGBT	Fase	S (VA)	V_{Lsh1} (V) ^a	I_{lnn3h} (A) ^a
4	RST	185,46	16,26	114,03
^a Valor eficaz total.				

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com base na potência aparente do reator monofásico, determinou-se o tamanho do núcleo necessário para a construção do elemento magnético, utilizando como referência as recomendações de Mcllyman (2004). Os parâmetros adotados contam na Tabela 49.

Tabela 49 – Dados do projeto físico do reator monofásico

Indutância do filtro shunt com reator monofásico (L_{sh1})	126,11 μ H
Frequência (f_o)	180 Hz
Densidade de corrente (J)	200 A/cm ²
Material magnético	Aço Silício
Permeabilidade magnética (μ_m)	1500
Densidade de fluxo (B_{ac})	1.4 T
Fator de utilização da janela (K_u)	0,3
Fator de forma de onda (K_f)	4,44

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para determinar o núcleo viável para construção do elemento magnético, calculou-se o produto das áreas, A_p , conforme a Equação (35).

$$A_p = \frac{V_{Lsh1} \cdot I_{nn3h} \cdot (10^4)}{K_f \cdot K_u \cdot f_o \cdot B_{ac} \cdot J} = 276,19 \text{ cm}^4 \quad (35)$$

Onde:

A_p = Produto das áreas

B_{ac} = Densidade de fluxo

f_o = Frequência de ressonância série

I_{nn3h} = Valor eficaz total da corrente no indutor monofásico

J = Densidade de corrente

K_f = Fator de forma de onda

K_u = Fator de utilização da janela

V_{Lsh1} = Valor eficaz total da tensão no reator monofásico

Portanto, para elaboração do projeto será utilizado o núcleo 125UI abordado em Mcllyman (2004), cujo os dados são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Dados do Núcleo 125UI

Peso do núcleo (Wtfe)	2725 gramas
Comprimento médio da espira (MLT)	18,29 cm
Seção Magnética (Ac)	9,577 cm ²
Área da Janela (Wa)	30,242 cm ²
Produto das Áreas (Ap)	289,614 cm ⁴
Área de superfície (At)	685 cm ²
Comprimento da Janela (G)	9,525 cm
Comprimento do caminho magnético (MPL)	38,10 cm
Espessura da lâmina do núcleo (E)	3,175 cm

Fonte: Elaboração própria (2019).

Uma vez determinado o núcleo, calculou-se o número de espiras através da Equação (36).

$$N_L = \frac{V_{Lsh1} \cdot (10^4)}{K_f \cdot f_o \cdot A_c} = 15 \text{ espiras} \quad (36)$$

Onde:

A_c = Seção Magnética

f_o = Frequência de ressonância série

K_f = Fator de forma de onda

N_L = Número de espiras

V_{Lsh1} = Valor eficaz total da tensão no reator monofásico

Em seguida, calculou-se o valor do entreferro de acordo com a Equação (37).

$$l_g = \left(\frac{0,4 \cdot \pi \cdot N_L^2 \cdot A_c \cdot (10^{-8})}{L_{sh1}} \right) - \left(\frac{MPL}{\mu_m} \right) = 0,194 \text{ cm} \quad (37)$$

Onde:

A_c = Seção Magnética

l_g = Valor do entreferro

L_{sh1} = Indutância do filtro *shunt* com reator monofásico

N_L = Número de espiras

MPL = Comprimento do caminho magnético

μ_m = Permeabilidade magnética

Sem entreferro a indutância é proporcional apenas à permeabilidade do núcleo, que é um parâmetro extremamente dependente da temperatura e do ponto de operação. A adição do entreferro introduz uma relutância muito maior que a relutância do material magnético, fazendo com que o valor de L_{sh1} seja praticamente insensível às variações na permeabilidade do núcleo, além disso, o acréscimo do entreferro permite que o indutor opere com maiores valores de corrente no enrolamento sem que ocorra saturação do núcleo.

Devido a utilização do entreferro calculou-se o fluxo de espraiamento que ocorre em torno do entreferro, *fring flux*, por meio da Equação (38).

$$F = \left(1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_c}} \cdot \ln \frac{2 \cdot G}{l_g} \right) = 1,288 \quad (38)$$

Onde:

A_c = Seção Magnética

F = *Fring flux*

G = Comprimento da Janela

l_g = Valor do entreferro

Considerando o fluxo de espraiamento que ocorre em torno do entreferro, recalculou-se o número de espiras, conforme mostrado na Equação (39).

$$N_{L,novo} = \sqrt{\frac{l_g \cdot L_{sh1}}{0,4 \cdot \pi \cdot A_c \cdot F \cdot (10^{-8})}} = 13 \text{ espiras} \quad (39)$$

Onde:

A_c = Seção Magnética

F = *Fring flux*

l_g = Valor do entreferro

L_{sh1} = Indutância do filtro *shunt* com reator monofásico

$N_{L,novo}$ = Número de espiras corrigido

Para o novo número de espiras, recalculou-se a densidade de fluxo através da Equação (40).

$$B_{ac,novo} = \frac{V_{Lsh1} \cdot (10^4)}{K_f \cdot f_o \cdot N_{L,novo} \cdot A_c} = 1,63 T \quad (40)$$

Onde:

A_c = Seção Magnética

$B_{ac,novo}$ = Densidade de fluxo corrigido

f_o = Frequência de ressonância série

K_f = Fator de forma de onda

$N_{L,novo}$ = Número de espiras corrigido

V_{Lsh1} = Fator de utilização da janela

A seção dos condutores é definida a partir da corrente eficaz da bobina (I_{nn3h_BT4}) e do valor especificado para a densidade de corrente (J), conforme apresenta a Equação (41).

$$A_{wL} = \frac{I_{nn3h}}{J} = 0,57 \text{ cm}^2 \quad (41)$$

Onde:

A_{wL} = Seção do condutor nu

I_{nn3h} = Valor eficaz total da corrente no indutor monofásico

J = Densidade de corrente

Logo, para execução do projeto escolheu-se o condutor AWG 00. Os dados do respectivo condutor são apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Dados do condutor AWG 00

AWG	Seção (mm ²)	Peso (g/m)	Resistência (Ohms/m)	Capacidade ^a (A)
00	67,43	596	0,000252	190

^a Capacidade para temperatura ambiente de 20 °C.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Por fim, verificou-se o fator de execução (FE) para o condutor AWG 00 através da Equação (42).

$$FE = \frac{N_{L,novo} \cdot S_{AWG00}}{W_a \cdot k_u} = 0,97 \quad (42)$$

Onde:

FE = Fator de execução

K_u = Fator de utilização da janela

$N_{L,novo}$ = Número de espiras corrigido

A_{AWG00} = Seção do condutor AWG 00

W_a = Área da Janela

Com os dados obtidos calculou-se o peso do condutor AWG 00 utilizado do indutor monofásico, conforme a Equação (43).

$$M_{cu} = MLT \cdot N_{L,novo} \cdot M_{AWG00} = 1417,11 \text{ gramas} \quad (43)$$

Onde:

$N_{L,novo}$ = Número de espiras corrigido

M_{AWG00} = Relação g/m do condutor AWG 00

M_{cu} = Massa de cobre

MLT = Comprimento médio da espira

Por meio da Equação (44), calculou-se a resistência do indutor monofásico.

$$R_{sh1,cal} = MLT \cdot N_{L,novo} \cdot R_{AWG00} = 599,18 \mu\Omega \quad (44)$$

Onde:

MLT = Comprimento médio da espira Área do condutor AWG 00

$N_{L,novo}$ = Número de espiras corrigido

R_{AWG00} = Relação entre Ω/m do condutor AWG 00

$R_{sh1,cal}$ = Resistência calculada do indutor monofásico do filtro *shunt* 3C1L

Em seguida, pode-se obter as perdas no indutor, sendo composto pelas perdas no cobre (P_{cu}), perdas no núcleo ($P_{fe,filtr}$) e perdas no entreferro ($P_{g,filtr}$), através das equações (45), (46) e (47), respectivamente.

$$P_{cu,filtr} = R_{sh1,cal} \cdot I_{nn3h}^2 = 7,79 \text{ W} \quad (45)$$

$$P_{fe,filtr} = (0,0005777 \cdot f_o^2 \cdot B_{ac,novo}^{1,86}) \cdot W_{tfe} = 23,16 \text{ W} \quad (46)$$

$$P_{g,filtr} = k_i \cdot E \cdot l_g \cdot f_o \cdot B_{ac,novo}^2 = 45,66 \text{ W} \quad (47)$$

Onde:

$B_{ac,novo}$ = Densidade de fluxo corrigido

E = Espessura da lâmina do núcleo

f_o = Frequência de ressonância série

I_{nn3h} = Valor eficaz total da corrente no indutor monofásico

k_i = Coeficiente de perda no entreferro para núcleos laminados (0,155)

l_g = Valor do entreferro

$P_{cu,filtr}$ = Perdas no cobre

$P_{fe,filtr}$ = Perdas no núcleo

$P_{g,filtr}$ = Perdas no entreferro

$R_{sh1,cal}$ = Resistência calculada do indutor monofásico do filtro *shunt* 3C1L

W_{tfe} = Peso do núcleo

Logo, calculou-se as perdas totais no induto monofásico, de acordo com a Equação (48).

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe,filtr} + P_{g,filtr} = 76,61 \text{ W} \quad (48)$$

Onde:

P_{Σ} = Perdas totais no indutor monofásico

$P_{cu,filtr}$ = Perdas no cobre

$P_{fe,filtr}$ = Perdas no núcleo

$P_{g,filtr}$ = Perdas no entreferro

Uma vez determinado as perdas totais, obteve-se a densidade de potência na superfície do núcleo, conforme a Equação (49).

$$\psi = \frac{P_{\Sigma}}{A_t} = 0,112 \text{ W/cm}^2 \quad (49)$$

Onde:

ψ = Densidade de potência na superfície do núcleo

A_t = Área de superfície

P_{Σ} = Perdas totais no indutor monofásico

Portanto, com os dados calculados determinou-se o aumento de temperatura por meio da Equação (50).

$$T_r = 450. (\psi)^{0,826} = 73,76 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (50)$$

Onde:

ψ = Densidade de potência na superfície do núcleo

T_r = Aumento de temperatura

Nota-se que a topologia 3C1L faz com que o indutor monofásico “veja” os capacitores das fases R, S e T como se estivessem em paralelo, isto é, apresenta uma capacitância equivalente igual a três vezes o valor da capacitância conectada em cada fase. E é por esta razão que o valor da indutância deve ser igual ao valor da topologia clássica dividido por três, além de ser monofásico e passa a ter massa e volume reduzidos.

B.1.2 BANCO CAPACITIVO

Para o projeto em questão utilizaram-se os modelos de capacitores apresentados na Tabela 52, que possuem características elétricas similares aos utilizados no banco capacitivo do QGBT-4.

Tabela 52 – Características das unidades capacitivas do filtro *shunt* para cada fase do QGBT-4

Referência	Unidades capacitivas ^a	Capacitância (µF)	Potência reativa (kVAr)	Dimensional DxH (mm)	Massa (kg)
UCW2,5V40 J8	1	45,90 uF ^a	2,50	53X141	0,36
UCW5V40 L10	22	91,84 uF ^b	5,00	60x156	0,46

^a Para cada fase do filtro *shunt* 3C1L.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Uma vez fornecido os dados dos capacitores pelo fabricante e determinado a quantidade em cada filtro, calculou-se a massa e volume do banco capacitivo do filtro *shunt*, conforme mostra a Tabela 53.

Tabela 53 – Massa e volume do banco capacitivo para cada fase do QGBT-4

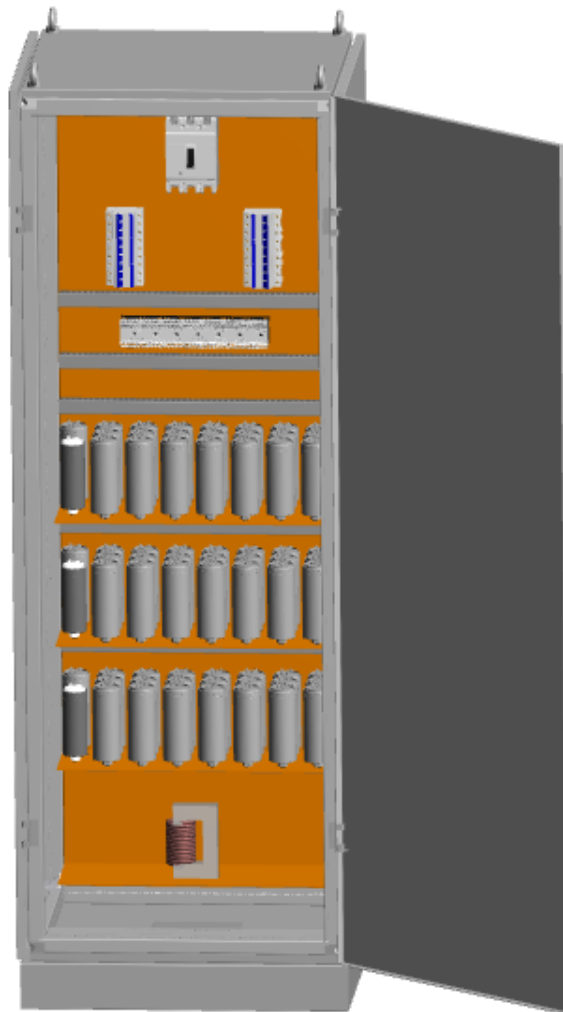
Referência	Unidades capacitivas ^a	Massa (kg)	Volume (cm ³)
UCW2,5V40 J8	1	0,36	311,07
UCW5V40 L10	22	10,12	9703,75

^a Para cada fase do filtro *shunt* 3C1L.

Fonte: Elaboração própria (2019).

B.1.3 DIMENSIONAMENTO DO PAINEL ELÉTRICO

Com os dados obtidos no dimensionamento do reator monofásico e do banco capacitivo, projetou-se através do *software* de CAD 3D (SOLIDWORKS, 2017) o painel elétrico necessário para abrigar o filtro *shunt* 3C1L, conforme observa-se na Figura 75.

Figura 75 – Painel elétrico com o filtro *shunt* 3C1L

Fonte: Elaboração própria (2019).

Nota-se na Figura 76 que apesar do aumento da quantidade de unidades capacitivas e do reator monofásico, o painel elétrico existente tem capacidade de abrigar o filtro *shunt* com topologia 3C1L. Portanto, o projeto do respectivo filtro não acarreta em um impacto significativo em termo de espaço na subestação abrigada do IFSC – Câmpus Florianópolis.

Além disso, visto que quanto maior a potência reativa capacitiva utilizada no filtro *shunt* 3C1L, menor será o valor da indutância do reator monofásico e conseqüentemente o volume.

Figura 76 – Pannel elétrico do banco capacitivo correspondente ao QGBT- 4



Fonte: Foto da subestação IFSC – Câmpus Florianópolis (2019).

**ANEXO A – PLACA DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO DE
500 KVA DA CONTRAFO S.A**

COMTRAFO
TRANSFORMADORES

ALISTINHO DUCCI, 280-B PARQUE INDUSTRIAL
00.138.806 / 0001-40 INS. EST. 534.03408-35
LÍDIO PROCÓPIO PARANÁ

FORMADOR TRIFÁSICO A SECO

Pot. kVA Norma
 Fabr. Fases Freq. Hz
 Elev. temp. enrol. °C Mat. isol. °C
 % à °C em V

veis (kV)	AT	BT
Industrial	20	10
Residencial	10	5

IP

Terminals			
	H1	H2	H3
POS	PAINEL LIGA		
1	10 - 13	11 - 14	12 - 15
2	13 - 07	14 - 08	15 - 09
3	07 - 16	08 - 17	09 - 18
4	16 - 04	17 - 05	18 - 06
5	04 - 19	05 - 20	06 - 21

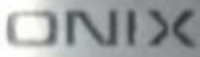
LIG. 

Terminals				
	X0	X1	X2	X3

Y



ANEXO B – PLACA DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO DE 500 KVA DA ONIX



Estrada Alegre km 01 - Parque Industrial 7
 Mandaguari - Paraná - Fone (044) 3233-8500
 www.onixod.com.br

NORMA ABNT
NBR-10295/88

**TRANSFORMADOR
A SECO**

Refer:	<input type="text" value="1530 0004"/>	Refrig:	<input type="text" value="AN"/>	Frequência:	<input type="text" value="60"/> Hz
Nº Serie:	<input type="text" value="74 670"/>	Tipo:	<input type="text" value="TTR"/>	Classe Materiais:	<input type="text" value="F"/>
Mês/Ano:	<input type="text" value="03/2010"/>	Grau Prot:	<input type="text" value="IP-00"/>	Imp. a 115° C:	<input type="text" value="7.3"/> %
Potência:	<input type="text" value="500"/> kVA	Fases:	<input type="text" value="3"/>	Massa:	<input type="text" value="1400"/> kg

Temperaturas (°C)	AT	BT	Temperatura Média	30
Elevação	105	105	Ambiente (°C)	Máxima
Limite	155	155		45

Níveis de Isq. Límite (kV)	AT	BT
Classe de Isolação	15	0.5
Tensão Aplicada	34	4
Impulso Atmosférico	95	—

Alta Tensão (AT)		
H1 - H2 - H3		
Tensão	Corrente	Interligar
13800V	20.9A	1 - 2
13200V	21.9A	2 - 3
12600V	22.9A	3 - 4
12000V	24.1A	4 - 5
11400V	25.3A	5 - 6

Baixa Tensão (BT)		
X0 - X1 - X2 - X3		
Tensão	Corrente	Interligar
380/220V	760A	—

Diagrama Fasorial Dyn-1

