



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANTONIO RENATO ARRUDA VIANA

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PASSIVOS DE SINTONIA ÚNICA
PARA ATENUAÇÃO DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTES E
TENSÕES ELÉTRICAS EM INSTALAÇÃO INDUSTRIAL**

SOBRAL

2017

ANTONIO RENATO ARRUDA VIANA

ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PASSIVOS DE SINTONIA ÚNICA
PARA ATENUAÇÃO DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTES E
TENSÕES ELÉTRICAS EM INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

Trabalho de conclusão de curso submetido à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Adson B. Moreira

SOBRAL

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A817e Arruda Viana, Antonio Renato.
Estudo e dimensionamento de filtros passivos de sintonia única para atenuação de componentes harmônicas de correntes e tensões elétricas em instalação industrial / Antonio Renato Arruda Viana. – 2017. 96 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2017.
Orientação: Prof. Me. Adson B. Moreira.
1. Harmônicas. 2. Filtros Passivos. 3. Filtro de sintonia única. 4. Qualidade de Energia. I. Título.
CDD 621.3
-

ANTONIO RENATO ARRUDA VIANA

ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PASSIVOS DE SINTONIA ÚNICA
PARA ATENUAÇÃO DE COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTES E
TENSÕES ELÉTRICAS EM INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

Trabalho de conclusão de curso submetido à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Adson B. Moreira

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Adson B. Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engº Eletricista Fabiano da Silva Teixeira

“O tamanho dos seus sonhos deve sempre exceder sua capacidade atual de alcançá-los. Se seus sonhos não te assustam, então não são grandes o suficiente” – Ellen Johnson Sirleaf.

À minha família.
Aos meus pais, em especial.
E aos colegas e amigos que contribuíram
durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelos conselhos, apoio incondicional em minhas decisões.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa do Ciência Sem Fronteiras, foi de imenso conhecimento, enriquecimento pessoal e profissional.

Aos professores da Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Sobral pelos ensinamentos e críticas ao longo da graduação.

Ao Prof. Dr. Adson B. Moreira, pela excelente orientação.

Aos participantes da banca examinadora Profa. Me. Vanessa Siqueira de Castro e Engenheiro Eletricista Fabiano da Silva Teixeira, pelo tempo, pelas valiosas colaborações.

“Nós homens operários, penso que todos concordamos que temos harmônicos. Eu acredito que todos concordamos que como os pobres, os harmônicos sempre estarão conosco. Se pudéssemos elimina-los, nós o faríamos felizmente.” – J. B. Fiskén.

RESUMO

O presente trabalho foi motivado pela necessidade de maior eficiência energética e qualidade de energia em instalações elétricas, baseado em projeções crescentes do uso de dispositivos eletrônicos tratados por órgãos governamentais. A planta elétrica industrial fictícia escolhida para a verificação e correções, foi baseada na instalação elétrica do bloco I da Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Sobral. Para uma carga fictícia foram constatados harmônicos da corrente elétrica em discordância de normas nacionais e internacionais de qualidade de energia elétrica. Para a mitigação dessa distorção na forma de onda de tensão e corrente elétrica é apresentado o projeto e simulação de filtros passivos de sintonia única a serem instalados em paralelo em um dos quadros geral de força de baixa tensão elétrica que é alimentado por um transformador de 300 kVA na subestação que fornece energia para a instalação elétrica. A aplicação de filtros passivos promove a redução das distorções harmônicas apresentadas nas simulações a níveis aceitáveis à norma IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 519. A simulação engloba desde o sistema de distribuição da concessionária até a carga. Os resultados de simulação mostram a eficácia da utilização de filtros passivos de sintonia em 5^a, 7^a e 11^a ordens harmônicas.

Palavras-chave: Harmônicas. Filtros Passivos. Filtro de sintonia única. Qualidade de Energia.

ABSTRACT

This work is influenced by the need of greater energetic efficiency and power quality in electrical systems, based on growing projections made in the usage of electronic devices supported by governmental agencies. The chosen fictional electrical system used to analyze and adjust, was based on the electrical installation of the building I of Federal University of Ceará, *Campus de Sobral*. Using a fictional load, it was possible to verify electrical harmonic currents disagreeing from national and international standards of power quality. To mitigate this distortion in voltage and current wave forms, it is shown the project and simulations of passive single tuned filters to be installed in parallel to a power distribution unit of lower electric voltage that is fed by a transformer of 300 *kVA* on a substation which connects the university to the electrical grid. The use of passive filters provides the reduction of harmonic distortions shown on simulations, to a desired level taken as reference from the standard IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) 519. The simulation includes from the distribution system to the load. Simulation results shows the efficiency in the use of passive single tuned filters to 5th, 7th and 11th harmonic orders.

Keywords: Harmonics. Passive filters. Single tuned filter. Power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Onda resultante da fundamental e 5ª ordem.....	23
Figura 2.2 – Onda fundamental e 5ª ordem.	24
Figura 2.3 – Notch de tensão elétrica.	25
Figura 2.4 – Resposta em frequência do filtro passa-baixa.	28
Figura 2.5 – Resposta em frequência do filtro passa-alta.	28
Figura 2.6 – Resposta em frequência do filtro passa-faixa.....	28
Figura 2.7 – Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa.	29
Figura 2.8 – Configurações dos tipos mais comuns de filtros passivos, gráficos das relações R- X e Z- ω	29
Figura 2.9 – Filtro ativo monofásico simplificado.	30
Figura 2.10 – Filtro híbrido monofásico simplificado.....	31
Figura 2.11 – Transformador ligado em zig-zag.	31
Figura 3.1 – Sistema elétrico analisado.	34
Figura 3.2 – Sequência dos circuitos do transformador à carga.....	36
Figura 3.3 – Subestação de entrada do prédio da engenharia, Campus de Sobral.	37
Figura 3.4 – Esquemático para cálculo do valor do banco de reatores.	52
Figura 4.1 – Sistema elétrico analisado com PCC.....	56
Figura 4.2 – Procedimento iterativo para cálculo do filtro passivo.....	57
Figura 4.3 – Formas de tensão elétrica e corrente elétrica no PCC sem filtro.	58
Figura 4.4 – Sistema analisado com filtro passivo de 5ª ordem.	62
Figura 4.5 – Formas de tensão elétrica e corrente elétrica no PCC com filtro de 5ª harmônica.	62
Figura 4.6 – Sistema analisado com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens.....	65
Figura 4.7 – Forma de tensão e corrente elétrica com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens.	66
Figura 4.8 – Sistema analisado com filtros passivos de 5ª, 7ª e 11 ordens.....	68

Figura 4.9 – Forma de tensão elétrica e corrente elétrica com filtro, de 5 ^a , 7 ^a e 11 ^a harmônica.	69
Figura 4.10 – Ilustração do notch na onda de tensão elétrica.....	71
Figura 4.11 – Sistema elétrico com os filtros de 5 ^a , 7 ^a e 11 ^a ordens.....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Espectro harmônico da corrente elétrica, sem filtro em valores percentuais relativos à fundamental.	59
Gráfico 4.2 – Espectro harmônico da tensão elétrica, sem filtro em valores percentuais relativos à fundamental.	59
Gráfico 4.3 – Espectro harmônico da corrente elétrica, com filtro 5ª ordem em valores percentuais relativos à fundamental.	63
Gráfico 4.4 – Espectro harmônico da tensão elétrica, com filtro 5ª ordem em valores percentuais relativos à fundamental.	64
Gráfico 4.5 – Espectro harmônico da corrente elétrica, com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.	67
Gráfico 4.6 – Espectro harmônico da tensão elétrica, com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.	67
Gráfico 4.7 – Espectro harmônico da corrente elétrica, com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.	70
Gráfico 4.8 – Espectro harmônico da tensão elétrica com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resistência e reatância dos condutores de cobre (valores médios).	35
Tabela 3.2 – Capacidade da corrente elétrica para barras retangulares de cobre sem pintura. 36	
Tabela 3.3 – Dados característicos de transformadores trifásicos a óleo para instalação interior ou exterior, classe 15kV.....	40
Tabela 4.1 – Limites de distorção harmônica de corrente elétrica para sistemas de baixa tensão elétrica (120V a 69kV eficaz).	60
Tabela 4.2 – Limites de distorção harmônicos de tensão elétrica.	61
Tabela 4.3 – Limites recomendados em comutações, notches.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônico
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
Std.	Standard (Padrão)
RLC	Resistor, indutor e capacitor
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
TDH	Taxa de Distorção Harmônica
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NT	Norma técnica
PCC	Ponto de conexão comum

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amperes
V	Volts
kVA	Quilovolt Ampere
%	Porcentagem
m	Metros
mm	Milímetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	ANÁLISE DE HARMÔNICOS E FORMAS DE MITIGAÇÃO.....	22
2.1	Análise de fontes geradoras de harmônicos.....	22
2.1.1	Características de cargas elétricas	22
2.1.2	Principais fontes de harmônicos	24
2.1.3	Efeitos dos harmônicos.....	26
2.2	Formas de mitigação	27
2.2.1	Tipos de filtragem.....	27
2.2.2	Defasagem com transformadores	31
2.3	Normas e regulamentações	32
2.4	Conclusão.....	33
3	Modelagem do sistema e modelagem do filtro passivo de frequência única	34
3.1	Introdução	34
3.2	Estudo e modelagem do sistema.....	34
3.2.1	Análise da carga.....	34
3.2.2	Modelagem de impedância de linha do sistema elétrico	35
3.3	Estudo e modelagem do filtro	52
3.3.1	Introdução à modelagem do filtro	52
3.3.2	Modelagem do filtro de sintonia única dessintonizado	53
3.4	Conclusão.....	54
4	Projeto Filtro Passivo	56
4.1	Introdução	56

4.2	Projeto filtro passivo	56
4.2.1	Projeto filtro passivo 5ª harmônica.....	61
4.2.2	Projeto filtro passivo 7ª harmônica.....	65
4.2.3	Projeto filtro passivo 11ª harmônica.....	68
4.3	Teste de desempenho do projeto de filtro passivo	72
4.3.1	110% da tensão elétrica nominal;.....	73
4.3.2	120% da tensão elétrica de pico de nominal;	74
4.3.3	135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal;.....	74
4.3.4	135% kVAr nominal;	74
4.4	Teste de desempenho de projeto filtro passivo de 5ª ordem.....	76
4.4.1	110% da tensão elétrica nominal para filtro passivo de 5ª ordem.....	76
4.4.2	135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal para filtro passivo de 5ª ordem	77
4.4.3	135% kVAr nominal para filtro passivo de 5ª ordem.....	77
4.5	Teste de desempenho de projeto filtro passivo de 7º ordem.....	78
4.5.1	110% da tensão elétrica nominal para filtro passivo de 7ª ordem.....	78
4.5.2	135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal para filtro passivo de 7ª ordem	78
4.5.3	135% kVAr nominal para filtro passivo de 7ª ordem.....	79
4.6	Teste de desempenho de projeto filtro passivo de 11º ordem.....	79
4.6.1	110% da tensão elétrica nominal para filtro passivo de 11ª ordem.....	79
4.6.2	135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal para filtro passivo de 11ª ordem	80
4.6.3	135% kVAr nominal para filtro passivo de 11ª ordem.....	80
4.7	Conclusão.....	81

5	Conclusão Final e trabalhos futuros	82
5.1	Recomendação para trabalhos futuros	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A	86

1 INTRODUÇÃO

Acompanhado dos avanços tecnológicos envolvendo a energia elétrica, o uso da corrente elétrica alternada, juntamente com a evolução dos dispositivos semicondutores trouxeram maior velocidade a evolução da eletrônica de potência. Os dispositivos semicondutores em sua aplicação residencial, predial e industrial, onde dentre as aplicações citadas anteriormente, o último com maior ênfase por meio de aplicações como chaves eletrônicas de potência, passaram a constituir inúmeros equipamentos eletrônicos. O uso das chaves eletrônicas na conversão de energia, por meio de comutações causam perturbações ao sistema elétrico no qual está conectado. As perturbações inerentes ao funcionamento dessas chaves eletrônicas de potência, são chamadas de harmônicas.

Em resposta à rápida utilização de soluções automatizadas, micro controladas, que sem a devida atenção, poderão acarretar negativos impactos financeiros, seja por meio de multas por órgão reguladores, concessionárias de energia elétrica, ou com a perda da vida útil dos equipamentos.

As harmônicas estão presentes desde o primórdio da utilização de sistema de corrente elétrica alternada, primeiro observado e estudado em 1893 durante o sobreaquecimento de um motor polifásico em Hartford, Conn. (OWEN, 1998), após somente cinco anos da publicação de Tesla sobre seu trabalho em máquinas polifásicas. Seu estudo toma maior importância quando se observa a expansão dos consumidores.

Segundo U.S. Energy Information Administration, até 2040 o consumo de energia elétrica aumentará em 69%. Relacionando o aumento de 69% em consumo de energia elétrica, até 70% de toda essa energia elétrica será consumida por setores industriais.

Devido a essas projeções, não somente produzir energia, mas também melhorar a eficiência serão de interesse de órgãos públicos, privados e engenheiros. Aproveitar a energia elétrica de maneira eficiente, envolve a utilização de filtros no sistema elétrico, com a finalidade de melhorar o desempenho deste e também a qualidade de energia elétrica.

O trabalho é organizado em cinco capítulos, onde trará um panorama do que é harmônico, seus efeitos, como mitigar e o teste de desempenho da solução implantada para o presente sistema projetado.

No primeiro capítulo são apresentadas as justificativas para a realização deste trabalho, bem como o mesmo foi dividido e estruturado.

O segundo capítulo discute como e porque surgem harmônicos no sistema elétrico, as características gerais dependendo do tipo de carga, as principais formas de mitigar ou suprimir harmônicos de corrente e tensão elétrica do sistema elétrico, bem como os efeitos desses harmônicos e como as normas regulamentadoras tratam o assunto.

No terceiro capítulo são abordadas as características da carga utilizada, o cálculo das impedâncias do sistema elétrico para a associação com a carga. São tratados também os aspectos para o projeto do tipo de filtro passivo escolhido.

No quarto capítulo são apresentados resultados de simulação em três casos. Inicialmente é apresentado o sistema alimentando uma carga não linear sem filtros, onde é analisado quais as harmônicas estão presentes e quais as mais influentes. O primeiro caso é analisado a adição do filtro passivo de 5ª ordem. No segundo caso, verifica-se os harmônicos do sistema elétrico com os filtros passivos de 5ª e 7ª ordens. No terceiro caso, a análise é realizada com os filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens conectados ao sistema elétrico. A adequação do sistema analisa as normas nacionais e internacionais, quanto aos limites permitidos para as distorções e também quanto aos esforços elétricos permitidos pelos elementos construtivos do filtro.

No quinto capítulo será abordado e comentado sobre os resultados obtidos durante o projeto do filtro passivo.

2 ANÁLISE DE HARMÔNICOS E FORMAS DE MITIGAÇÃO

Neste capítulo, são abordadas as características de algumas cargas mais comuns no sistema elétrico, como estas estão subdivididas e seu comportamento em relação a tensão e corrente elétricas. Logo após, serão comentados os efeitos dessas cargas no sistema elétrico, bem como as formas de mitigação desses efeitos gerados para a rede elétrica, que são causadores de prejuízos na qualidade de energia e bem como prejuízos financeiros, tanto para os fornecedores quanto para os consumidores de energia elétrica.

2.1 Análise de fontes geradoras de harmônicos

2.1.1 Características de cargas elétricas

Segundo LEÃO (2014), o estudo do sistema elétrico pode ser complexo quando analisado como um todo, embora esse todo seja composto por elementos individuais e simples. Um comportamento interessante, são as propriedades do sistema elétrico, que não dependem obrigatoriamente das características dos fornecedores, mas também das particularidades dos consumidores, as cargas.

As cargas elétricas de modo geral podem ser divididas em três, de acordo com CASTRO (2017), em: Críticas, sensíveis e perturbadoras.

Críticas ou essenciais: Não devem sofrer interrupções de fornecimento de energia ou operação indevida causada pelo suprimento de energia, sob pena de risco de vida ou prejuízos.

Sensíveis: São cargas elétricas que não suportam variações de tensão elétrica mesmo de curta duração (inferior à 30 ciclos).

Perturbadoras: Cargas elétricas cuja a operação pode causar perturbações tais como distorções harmônicas, desequilíbrios, flutuação de tensão elétrica, afundamento, entre outros.

Também as cargas podem ser caracterizadas de acordo com seu comportamento com a tensão elétrica e corrente elétrica, segundo DAS (2015) resumindo-se à:

Cargas lineares:

Uma carga é caracterizada linear quando com a aplicação de uma tensão elétrica senoidal resulte em uma corrente elétrica senoidal. A carga apresenta uma constante em estado

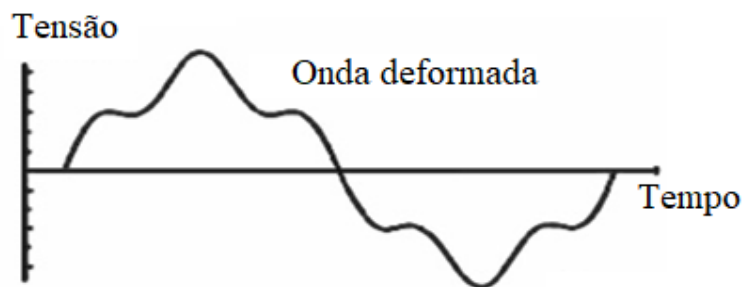
estacionário de impedância durante a aplicação de tensão elétrica senoidal. Exemplos destas, são lâmpadas incandescentes e motores elétricos que não são alimentados por conversores eletrônicos.

Cargas não lineares:

Com a aplicação de uma tensão elétrica senoidal não resulta em uma corrente elétrica senoidal. Essas cargas não apresentam impedância constante durante a aplicação da tensão elétrica senoidal. Não há linearidade, na relação entre a tensão aplicada e a corrente, o que promove mudanças na reatância em proporção à frequência, embora seja linear durante aquela frequência aplicada. As cargas não lineares podem consumir correntes elétricas que sejam descontínuas, ou pulsantes, partes senoidais, entre outras.

Os harmônicos são componentes senoidais ou cossenoidais de uma onda periódica distorcida, com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. A representação de uma forma de onda distorcida que contém a fundamental e o harmônico de 5ª ordem, é mostrada na Figura 2.1.

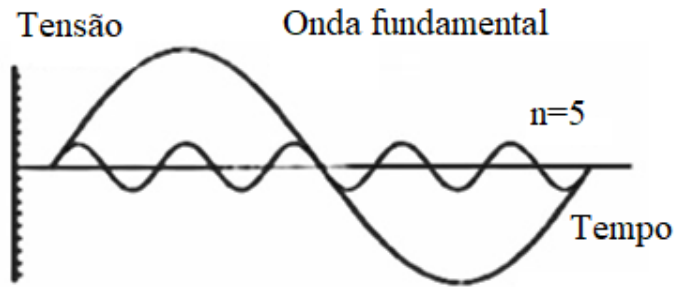
Figura 2.1 – Onda resultante da fundamental e 5ª ordem.



Fonte: Ebah.

Na Figura 2.2, constata-se que ambas formas de onda de tensão elétrica apresentam formas senoidais com frequências diferentes.

Figura 2.2 – Onda fundamental e 5ª ordem.



Fonte:Ebah.

2.1.2 Principais fontes de harmônicos

Distintos setores do sistema elétrico estão expostos a diferentes tipos de cargas, embora as principais fontes de harmônicos sejam basicamente três: dispositivos eletrônicos de potência, dispositivos eletromagnéticos e dispositivos a arco.

2.1.2.1 Dispositivos eletrônicos de potência

Os conversores eletrônicos são a mais importante classe dos elementos produtores de corrente elétrica harmônicas atualmente, de acordo com LEÃO (2014). Uma vez que esses componentes se tornaram tão comuns em instalações residenciais e comerciais, com fontes chaveadas monofásicas.

Os conversores eletrônicos produzem alta quantidade de harmônico de 3ª ordem e superiores, presentes na corrente elétrica. Conseqüentemente, ocorre o sobreaquecimento do neutro especialmente em instalações mais antigas, pois estas estarão mais desprovidas em relação aos cabos e preparação destes, de acordo com POMILIO (2017 b)

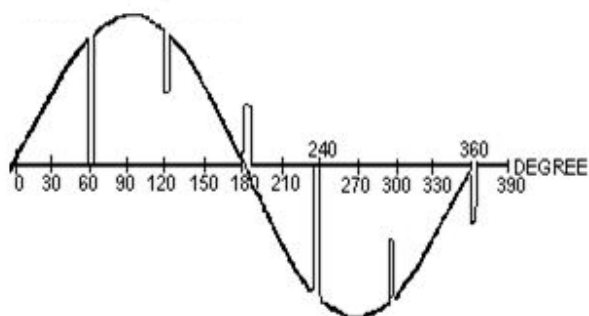
Os conversores eletrônicos trifásicos, comparados com os monofásicos, há o benefício da não produção de componentes harmônicas triplas de corrente elétrica. Além disso, dependendo da quantidade de pulsos do conversor, este irá produzir harmônicas de ordem $h = kq \pm 1$, onde q é o número de pulsos do conversor, e k são inteiros $\{1, 2, 3...\}$, conforme IEEE Std. 519/2014.

A tensão elétrica distorcida apresenta *notches*, que são componentes periódicas de distorção produzidas na forma de onda da tensão elétrica, relativos à operação normal do

conversor eletrônico de potência. O *notch* está relacionado à comutação das chaves eletrônicas de potência.

Num curto período de transição, embora mínimo, não é instantâneo. Logo o *notch* é gerado, que é um pequeno curto circuito nas duas fases, na qual a corrente elétrica tende ao infinito e a tensão elétrica tende a zero, como pode ser observado na Figura 2.3. O *notch* na tensão elétrica causa uma redução do valor da tensão elétrica.

Figura 2.3 – Notch de tensão elétrica.



Fonte: Rockwell Automation.

2.1.2.2 Dispositivos eletromagnéticos

Os transformadores se destacam como cargas produtoras de harmônicos quando operados sobredimensionados, devido ao seu núcleo apresentar característica não linear entre a tensão e a corrente elétrica, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos a saturações.

Aspectos construtivos dos transformadores fazem com que estes trabalhem próximo à curva de saturação, em condição nominal. Durante o funcionamento na condição nominal, estes operaram na zona de saturação dos componentes ferromagnéticos, sucedendo assim à corrente elétrica de magnetização acima da nominal, distorcida e com harmônicos.

As componentes harmônicas nos transformadores apresentam componentes de 3ª ordem harmônica com valor de até 50% da fundamental, conforme LEÃO (2014). Podendo ainda estarem relacionadas às perdas por ressonância no circuito. Influenciando as ligações dos transformadores.

Com relação às máquinas rotativas, os aspectos construtivos influenciam na quantidade de harmônicos injetados no sistema elétrico, tais como o número, distribuição espacial das ranhuras e também a distribuição espacial dos enrolamentos.

2.1.2.3 Dispositivos à arco

Este tipo de carga é a mais perturbadora de todas citadas anteriormente, principalmente os fornos elétricos a arco. Estes causam perturbações harmônicas de corrente elétrica, distorcendo tensão elétrica da rede elétrica, inter-harmônicos e outros distúrbios.

Os fornos elétricos à indução apresentam harmônicos imprevisíveis e randômicos, pois estes variam de acordo com o arco elétrico em cada ciclo. As harmônicas de maior influência nestes são de 3ª, 2ª, 5ª e 4ª ordens harmônicas.

Embora os fornos à arco apresentem valores elevados de distorção, em comparação com os conversores eletrônicos, estes apresentam menores valores médios.

2.1.3 Efeitos dos harmônicos

Harmônicos causam aumento nas perdas no cobre, no ferro e dielétrico, com a redução da vida útil dos equipamentos, operações indevidas relacionados a erros decorrentes da influência das harmônicas, de acordo com KASSICK (2008).

Onde irão impactar em prejuízos financeiros basicamente de dois tipos:

- Imediatos: Como disparos indevidos de relés, queima de fusíveis, flutuação de tensão elétrica, mau funcionamento de componentes;
- Longo prazo: Aquecimento dos capacitores, equipamentos, condutores, transformadores, entre outros.

As implicações devido os efeitos dos harmônicos são dos mais variados:

- Aparecimento de vibrações e ruídos;
- Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos e de capacitores;
- Erro nas medições elétricas;
- Erro no controle dos conversores eletrônicos;
- Erro na atuação dos dispositivos de proteção;
- Sobre corrente elétrica de neutro;
- Interferências e ruídos eletromagnéticos.

2.2 Formas de mitigação

Segundo DAS (2015) em cerca de dez anos, 60% das cargas das instalações elétricas serão não lineares, impulsionados pelo crescimento de cargas eletrônicas residenciais, afetando, a operação dos equipamentos elétricos disponíveis nas residências. Nas instalações industriais, as cargas não lineares exercem impactos expressivos, pois as cargas industriais estão mais sensíveis a variações mais curtas devido as soluções micro controladas, implicando na importância do estudo de mitigação das harmônicas.

As subseções 2.2.1.1 até 2.2.1.3 apresentam as principais soluções técnicas disponíveis para eliminar ou reduzir os efeitos nas instalações elétricas.

2.2.1 Tipos de filtragem

2.2.1.1 Filtragem passiva

Os filtros passivos apresentam alguns benefícios, como a simplicidade e o preço destes os tornam atraentes para diversas aplicações, embora estejam sujeitos a um novo projeto quando houver variações nas cargas.

Os filtros passivos são basicamente associações RLC, variando então suas formas de ligações. Podem ser conectados a uma mesma instalação elétrica de diferentes estruturas, sintonizando diferentes ordens harmônicas, podendo ainda agir com compensação reativa. Entretanto, para a utilização deste tipo de filtragem simples, que se utiliza de elementos básicos tais como resistores, indutores e capacitores, se faz necessário o conhecimento dos aspectos intrínsecos à instalação, pois podem haver ressonâncias, promovendo assim a elevação em certos níveis harmônicos, que antes não eram um problema para a instalação elétrica.

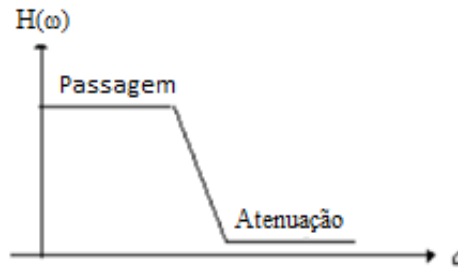
Existem diversas topologias para filtros passivos, embora estes possam ser divididos em dois subgrupos para a atenuação de harmônicas. Uma topologia é baseada em um caminho de alta impedância entre a unidade geradora e a unidade consumidora, com o intuito de não permitir o fluxo de harmônicas para a instalação elétrica.

A outra topologia realiza a criação de um caminho de baixa impedância para que o conteúdo harmônico seja eliminado do sistema elétrico, por meio de um sistema em paralelo ou *shunt*.

Os tipos básicos de filtros são quatro:

Passa-baixa: Atenua ou suprime sinais com frequências acima de uma frequência particular chamada de frequência de corte, como se observa a resposta em frequência na Figura 2.4.

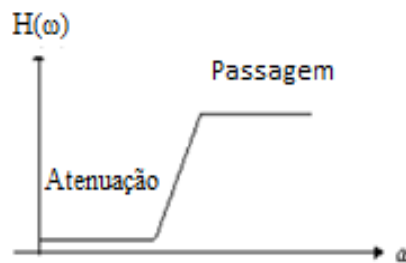
Figura 2.4 – Resposta em frequência do filtro passa-baixa.



Fonte: Autor.

Passa-alta: Suprime ou atenua sinais com frequência menores do que frequência de corte, como mostra sua resposta em frequência na Figura 2.5.

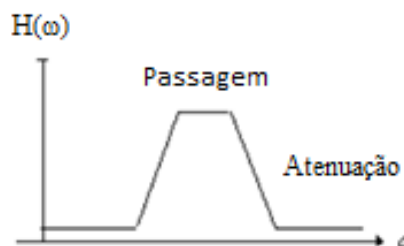
Figura 2.5 – Resposta em frequência do filtro passa-alta.



Fonte: Autor.

Passa-faixa: Atenua ou suprime sinais com frequências de determinada banda de frequência, como mostra sua resposta em frequência na Figura 2.6.

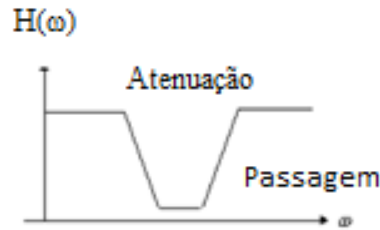
Figura 2.6 – Resposta em frequência do filtro passa-faixa.



Fonte: Autor.

Rejeita-faixa: Atenua ou suprime sinais de uma frequência de acordo com a resposta em frequência do filtro mostrada na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Resposta em frequência do filtro rejeita-faixa.



Fonte: Autor.

Segundo DAS (2004) e (2015), os tipos de filtros passivos mais comuns são os exemplificados na Figura 2.8. Observa-se as respostas do comportamento entre resistência-reatância e impedância-frequência para cada tipo de filtro.

Figura 2.8 – Configurações dos tipos mais comuns de filtros passivos, gráficos das relações R-X e Z- ω .

Tipo de filtro	Passa baixa	Passa alta	Dupla sintonia	Composto
Configuração				
Gráfico R-X				
Gráfico Z- ω				

Fonte: DAS (2004).

Da Figura 2.8, o gráfico relacionado R-X é referente ao comportamento no momento do projeto entre a resistência e reatância do filtro, e Z- ω é o comportamento do filtro em relação à ordem harmônica escolhida a ser filtrada.

O filtro passa-banda é conhecido como filtro de primeira ordem pois é comumente, mais eficaz em baixas frequências, sugeridos para correções até 13ª ordem harmônica. Então, a partir

dessa ordem harmônica, já é sugerido utilizar passa-alta, pois este terá melhor eficiência conforme DAS (2015).

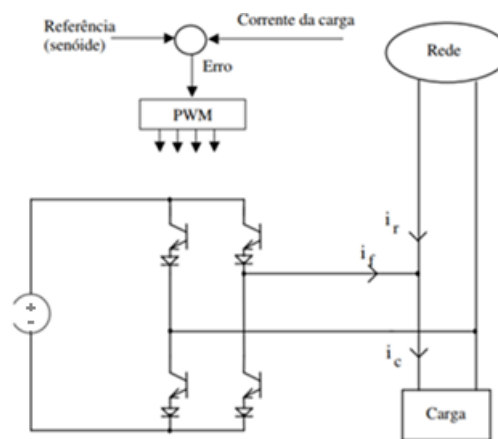
2.2.1.2 Filtragem ativa

Filtros ativos são dispositivos eletrônicos que através de reconhecimento iterativo do sistema elétrico, este gera correntes elétricas harmônicas afim de cancelar ou atenuar as distorções harmônicas presentes no sistema elétrico.

Os filtros ativos possuem alguns benefícios em relação aos filtros passivos. Dentre estes estão a compensação exata de reativos e a dinamicidade do sistema no acréscimo ou decréscimo de cargas elétricas. Pelo fato de ser iterativo, este está constantemente recebendo dados atualizados do sistema e assim podem gerar somente os reativos a serem compensados, exemplificado na Figura 2.9.

Em contrapartida, há dois aspectos que valem ser citados: o preço ainda é relativamente alto, e a metodologia de projeto mais complexo comparados com filtragem passiva, segundo POMILIO (2017 a).

Figura 2.9 – Filtro ativo monofásico simplificado.



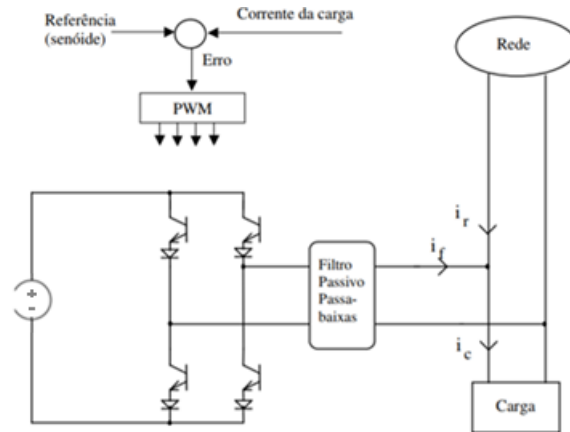
Fonte: POMILIO (2017 a).

2.2.1.3 Filtros híbridos

Este tipo de filtro reúne características das duas metodologias apresentados nas seções 2.2.1.1 e 2.2.1.2. De acordo com a aplicação, diversos arranjos podem ser aplicados. Unindo então elementos passivos, tais como resistores, capacitores e indutores, com construções mais complexas, tais como conversores em ponte, tiristores, MOSFETs, entre outros.

O uso mais comum deste é o uso de filtragem passiva sintonizando a harmônica predominante, e o filtro ativo se encarregaria de filtrar todas as outras harmônicas, como exemplificado na Figura 2.10. Utilizando o filtro híbrido, o projeto poderá ser mais economicamente viável, evitando maiores esforços pelo filtro ativo, que envolve componentes mais complexos, e repassando esse esforço elevado à componentes mais simples e mais baratos.

Figura 2.10 – Filtro híbrido monofásico simplificado.

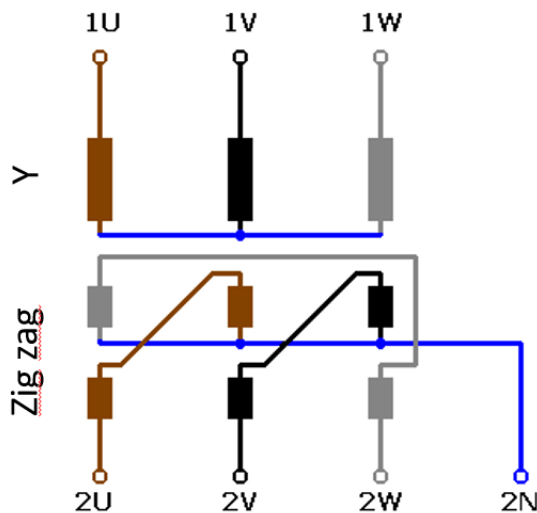


Fonte: POMILIO (2017 a).

2.2.2 Defasagem com transformadores

Existem algumas conexões de transformadores que possibilitam a atenuação de harmônicas contidas na instalação. Um exemplo é a ligação zig-zag na Figura 2.11. Tais ligações geralmente já são montadas durante o projeto e montagem das cargas não lineares, reduzindo o conteúdo harmônico a ser injetado.

Figura 2.11 – Transformador ligado em zig-zag.



Fonte: Wikipédia.

2.3 Normas e regulamentações

Dentre as causas e efeitos mostrados na seção 2.2, sabe-se que em sua grande maioria as cargas atuais causam ou sofrem consequências de distorções harmônicas de tensão ou corrente elétricas.

Com o intuito de regular os níveis de distorções, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do manual Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) em seu módulo 8, que trata sobre qualidade de energia elétrica, define que a unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras inferiores a um dado nível de tensão elétrica especificado em norma, mantenha um fator de potência de 0,92 ou mais, indutivo ou capacitivo e define parâmetros de TDH (taxa de distorção harmônica) de tensão elétrica de 10% para o nível da tensão elétrica utilizado no trabalho, embora nada relativo à corrente elétrica. Contando somente com tal indicação nacional, torna a regulamentação simplória em comparação às regulamentações internacionais como IEEE Std. 519/2014 ou IEC 61000-3-2, onde estes especificam seus limites de acordo com os níveis de distorções de tensão elétrica e de corrente elétrica.

Para avaliar o conteúdo harmônico das formas de onda de corrente e tensão elétrica, recorre-se a (2.1) para calcular a TDH_v (taxa de distorção harmônica de tensão elétrica) e a (2.2) para determinar a TDH_i (taxa de distorção harmônica de corrente elétrica).

$$TDH_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n\text{ eficaz}}^2}}{V_{1\text{ eficaz}}} \quad (2.1)$$

$$TDH_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n\text{ eficaz}}^2}}{I_{1\text{ eficaz}}} \quad (2.2)$$

Onde:

$V_{n\text{ eficaz}}$: valor eficaz da tensão elétrica para harmônica de ordem n ;

$I_{n\text{ eficaz}}$: valor eficaz da corrente elétrica para harmônica de ordem n ;

$V_{1\text{ eficaz}}$: valor eficaz da fundamental de tensão elétrica;

$I_{1\text{ eficaz}}$: valor eficaz da fundamental da corrente elétrica;

2.4 Conclusão

São apresentadas as características relativas as cargas elétricas, e uma melhor compreensão sobre o que é harmônico, suas causas e efeitos no sistema elétrico. O comportamento de alguns tipos de cargas mais comuns no sistema elétrico, a caracterização dos harmônicos mais comuns relativo a categoria de carga.

Os conhecimentos básicos sobre o funcionamento dos filtros baseado na banda passante desejada. Também a categorização dos filtros, organizados com relação os elementos construtivos do modelo.

3 MODELAGEM DO SISTEMA E MODELAGEM DO FILTRO PASSIVO DE FREQUENCIA ÚNICA

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentados o sistema elétrico proposto, discutidos aspectos e procedimentos utilizados para modelagem da instalação elétrica, bem como para o modelo e projeto do filtro passivo escolhido. A escolha dos filtros de sintonia única se deu por sua larga utilização na indústria, e simples projeto, segundo DAS (2015).

3.2 Estudo e modelagem do sistema

3.2.1 Análise da carga

A carga utilizada no sistema representa um conversor CA/CC utilizados em meio industrial, sendo a escolha da quantidade de pulsos utilizados, dependentes da potência empregada, conforme DIAS (2002).

A carga não linear conectada ao sistema consiste em um retificador trifásico em ponte de onda completa alimentando uma resistência ($R = 12 \Omega$), como pode ser observada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Sistema elétrico analisado.



Fonte: Autor.

Os valores referentes as impedâncias foram calculadas a partir dos valores disponíveis no projeto da instalação elétrica do bloco I, e outros valores foram baseados na capacidade de condução dos fios a partir da NBR 5410/2004 ou a partir de projetos similares, como em MAMEDE FILHO (2010).

Aumentar a quantidade de pulsos do conversor implica em aumento do custo do equipamento, embora utilizar conversores de mais pulsos reduza os harmônicos injetados na rede elétrica.

Comparando o conversor de 3 pulsos com o conversor de 6 pulsos, verifica-se uma redução de 90% do 5º harmônico no conversor 6 pulsos. As harmônicas de maiores influencias no conversor 6 pulsos utilizado no presente trabalho, são as de 5ª e 7ª ordens harmônicas, de acordo com DIAS (2002).

3.2.2 Modelagem de impedância de linha do sistema elétrico

A modelagem do sistema elétrico foi realizada conforme MAMEDE FILHO (2010) e em MORAIS (2011). A partir de informações dispostas na planta elétrica do projeto do *campus*, foram coletadas informações. Referente a potência do transformador que alimenta o prédio, 300 *kVA*. Onde também estavam disponíveis as bitolas dos condutores utilizados na instalação elétrica, desde o transformador até o circuito do laboratório no qual a carga será acionada.

Foi possível aproximar os valores médios de resistência e reatância para os condutores com o auxílio da Tabelas 3.1, obtido em MAMEDE FILHO (2010). Os valores utilizados encontram-se no Apêndice A.

Tabela 3.1 – Resistência e reatância dos condutores de cobre (valores médios).

Seção	Impedância de Sequencia Positiva ($m\Omega/m$)		Impedância de Sequencia Negativa ($m\Omega/m$)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8137	0,1378	16,6137	2,9262
2,5	8,8882	0,1345	10,6882	2,8755
4	5,5518	0,1279	7,3552	2,8349
6	3,7035	0,1225	5,51135	2,8
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,189	2,7173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,445	0,1127	2,245	2,5991
70	0,3184	0,1127	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,109	2,0352	2,5325
120	0,1868	0,1076	1,9868	2,5104
150	0,1502	0,1074	1,9502	2,4843
185	0,1226	0,1073	1,9226	2,4594
240	0,0958	0,107	1,8958	2,4312
300	0,0781	0,1068	1,8781	2,4067
400	0,0608	0,1058	1,8608	2,3757
500	0,0507	0,1051	1,855	2,3491
630	0,0292	0,1042	1,8376	2,3001

Fonte: MAMEDE FILHO (2010).

Os valores médios de resistência e reatância para os barramentos foram obtidos com o auxílio da Tabela 3.2 presente em MAMEDE FILHO (2010).

Os valores dos comprimentos dos trechos de circuitos, por meio de suas localizações físicas.

Tabela 3.2 – Capacidade da corrente elétrica para barras retangulares de cobre sem pintura.

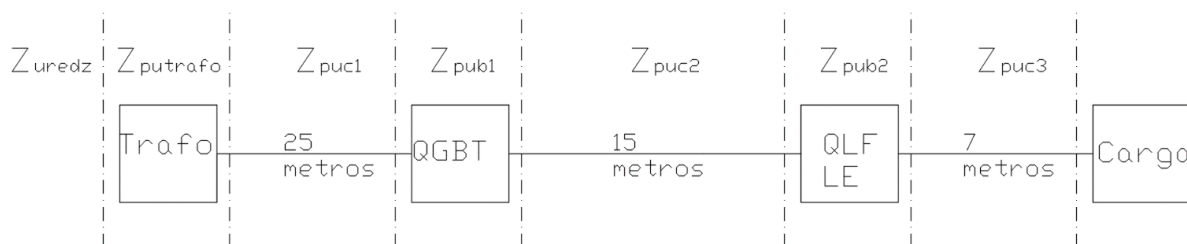
Largura mm	Espessura mm	Seção mm ²	Peso kg/m	Resistência mΩ/m	Reatância mΩ/m	Capacidade de Corrente Permanente (A)					
						Barra Pintada			Barra Nua		
						Número de Barras por Fase					
1	2	3	1	2	3						
12	2	23,5	0,209	0,9297	0,2859	123	202	128	108	182	216
15	2	79,5	0,262	0,741/6	0,2774	148	240	261	128	112	247
	3	44,5	0,396	0,49119	0,2619	187	316	381	162	282	361
20	2	39,5	0,351	0,5531	0,2664	189	302	313	162	264	298
	3	59,5	0,329	0,3672	0,2509	273	394	454	204	348	431
	5	99,1	0,882	0,2203	0,2317	319	560	728	274	500	690
	10	199	1,77	0,1098	0,2054	497	924	1320	427	825	1180
25	3	74,5	0,663	0,2932	0,2424	267	470	525	245	412	498
	5	125	1,11	0,1748	0,2229	384	662	839	327	586	795
30	3	89,5	0,796	0,2441	0,2355	337	544	593	285	476	564
	5	140	1,33	0,1561	0,2187	447	760	944	379	627	896
	10	299	2,66	0,0731	0,19	676	1200	1670	573	1060	1480
40	3	119	1,05	0,1836	0,2248	435	692	725	366	600	690
	5	199	1,77	0,1098	0,2054	573	952	1140	482	836	1090
	10	399	3,55	0,0548	0,1792	850	1470	2000	715	1290	1770
50	5	249	2,22	0,0877	0,1969	697	1140	1330	583	994	1260
	10	499	4,44	0,0438	0,1707	1020	1720	2320	832	1510	2040
60	5	299	2,66	0,0731	0,19	826	1330	1510	688	1150	1440
	10	599	5,33	0,0365	0,1639	1180	1960	2610	989	1720	2300
80	5	399	3,55	0,0548	0,1792	1070	1680	1830	885	1450	1750
	10	799	7,11	0,0273	0,153	1500	2410	3170	1240	2110	2790
100	5	499	4,44	0,0438	0,1707	1300	2010	2150	1080	1730	2050
	10	988	8,89	0,0221	0,145	1810	2,841	3720	1490	2480	3260
120	10	1200	107	0,0182	0,1377	2110	3280	4270	1740	2860	3740
160	10	1400	14,2	0,0137	0,1268	2700	4130	5360	2220	3590	4680
200	10	2000	17,8	0,0109	0,1184	3290	4970	6430	2690	4310	5610

Fonte: MAMEDE FILHO (2010).

A modelagem foi realizada foram dadas em por unidade (*pu*). O cálculo das impedâncias será em *pu* e ao final será somado todas impedâncias e convertido para valor em ohms ($Z_n = \sum_n Z_n$).

O sistema em análise tem a estrutura exemplificada na Figura 3.2, com a disposição das impedâncias de cada trecho.

Figura 3.2 – Sequência dos circuitos do transformador à carga.



Fonte: Autor.

Onde:

\bar{Z}_{uredz} : impedância reduzida em $[pu]$;

$\bar{Z}_{putrafo}$: impedância do transformador em $[pu]$;

\bar{Z}_{puc1} : impedância do trecho entre o transformador e o QGBT em $[pu]$;

\bar{Z}_{pub1} : impedância do primeiro barramento, do QGBT em $[pu]$;

\bar{Z}_{puc2} : impedância do trecho entre o QGBT até o QLF LE em $[pu]$;

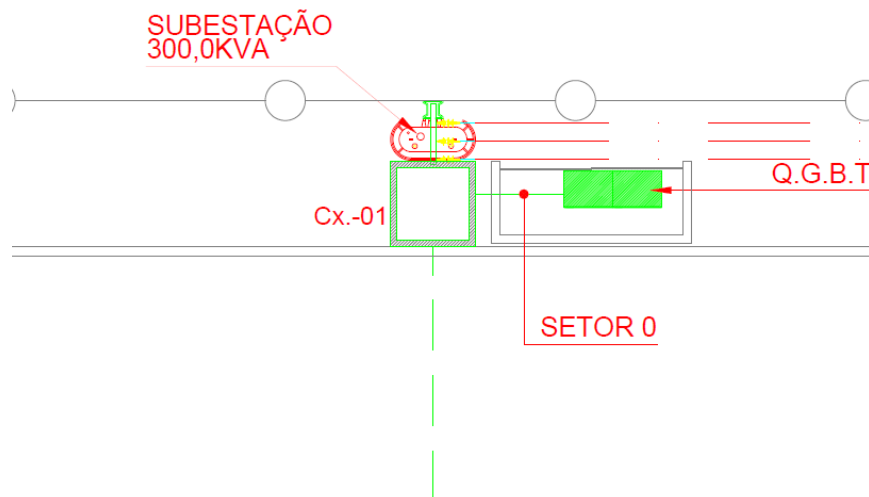
\bar{Z}_{pub2} : impedância do segundo barramento, do QLF em $[pu]$;

\bar{Z}_{puc3} : impedância do trecho entre o QLF até a carga em $[pu]$.

Foi realizada a coleta de dados de potência do transformador e corrente de curto circuito de MAMEDE FILHO (2010), onde é calculada para um centro de comando de motores. Em posse da potência do transformador da instalação elétrica do *campus* seguindo a aproximação realizada em MORAIS (2011) é estimado uma potência de curto circuito para o sistema elétrico por meio de regra de três simples e aproximar um valor de impedância reduzida da concessionária.

O transformador da entrada do prédio da engenharia, extraída da planta elétrica da universidade exposto na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Substação de entrada do prédio da engenharia, *Campus* de Sobral.



Fonte: Adaptado da planta elétrica do bloco I da Universidade Federal do Ceará, *Campus Sobral*.

A potência de curto circuito em $[pu]$ suposta do ponto de entrega (P_{ccpu}) é determinada a partir da equação (3.1). De posse do valor de P_{ccpu} e da equação (3.2), determina-se o valor de X_{uredz} (reatância de impedância reduzida em $[pu]$).

$$P_{ccpu} = \frac{P_{nom} * P_{ccpuCM}}{P_{nomCM}} \quad (3.1)$$

O valor calculado de P_{ccpu} é:

$$P_{ccpu} = 35,853$$

Onde:

P_{nom} : potência nominal do transformador $[pu]$;

P_{ccpuCM} : potência de curto circuito em $[pu]$ disponível em MAMEDE FILHO (2010);

P_{nomCM} : potência nominal do transformador $[pu]$ disponível em MAMEDE FILHO (2010).

A impedância reduzida (\bar{Z}_{uredz}) pode ser representada por (3.2):

$$\bar{Z}_{uredz} = R_{uredz} + X_{uredz} \quad (3.2)$$

O valor calculado de \bar{Z}_{uredz} é:

$$\bar{Z}_{uredz} = 8,367 * 10^{-3}j$$

Onde:

R_{uredz} : resistência reduzida.

Segundo MAMEDE FILHO (2010), a resistência reduzida (R_{uredz}) pode ser desprezada por ser inferior ao valor da reatância do sistema de suprimento. Então, a reatância (X_{uredz}) em $[pu]$ pode ser calculada segundo a equação (3.3).

$$X_{uredz} = \frac{P_b}{P_{ccpu}} \quad (3.3)$$

O valor calculado de X_{uredz} é:

$$X_{uredz} = 8,367 * 10^{-3}j$$

Onde:

P_b : potência base, 300 kVA.

O modelo da impedância do transformador é representado pela impedância $\bar{Z}_{putrafo}$ dado por (3.4). De modo análogo, a obtenção da impedância reduzida do sistema (impedância em [pu]) para o transformador é determinado com os valores de $R_{putrafo}$ e $X_{putrafo}$.

$$\bar{Z}_{putrafo} = R_{putrafo} + X_{putrafo} \quad (3.4)$$

O valor calculado de $\bar{Z}_{putrafo}$ é:

$$\bar{Z}_{putrafo} = (12,333 + 43,277j) * 10^{-3}$$

O resistor ($R_{\%trafo}$) representa as perdas do transformador, sendo calculado de acordo com (3.5) e o valor de P_{cobre} extraído da Tabela 3.3 de acordo com MAMEDE FILHO (2010).

$$R_{\%trafo} = \frac{P_{cobre}}{P_{nom}} \quad (3.5)$$

O valor calculado de $R_{\%trafo}$ é:

$$R_{\%trafo} = 12,333 * 10^{-3}\Omega$$

Onde:

$R_{\%trafo}$: resistência percentual do transformador;

P_{cobre} : perdas no cobre para transformador de 300 kVA, disponível na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados característicos de transformadores trifásicos a óleo para instalação interior ou exterior, classe 15kV.

Potência [kVA]	Tensão [V]	Perdas em [W]		Rendimento	Regulação	Impedância
		A vazio	Cobre	(%)	(%)	(%)
15	220 a 440	120	300	96,24	3,32	3,5
30	220 a 440	200	570	96,85	3,29	3,5
45	220 a 440	260	750	97,09	3,19	3,5
75	220 a 440	390	1200	97,32	3,15	3,5
112,5	220 a 440	520	1650	97,51	3,09	3,5
150	220 a 440	640	2050	97,68	3,02	3,5
225	380 a 440	900	2800	97,96	3,63	4,5
300	220	1120	3900	97,96	3,66	4,5
	380 ou 440		3700	98,04	3,61	4,5
500	220	1700	6400	98,02	3,65	4,5
	380 ou 440		6000	98,11	3,6	4,5
750	220	2000	10000	98,04	4,32	5,5
	380 ou 440		8500	98,28	4,2	5,5
1000	220	3000	12500	98,1	4,27	5,5
	380 ou 440		11000	98,28	4,19	5,5
1500	220	4000	18000	98,2	4,24	5,5
	380 ou 440		16000	98,36	4,16	5,5

Fonte: MAMEDE FILHO (2010).

O próximo passo é aplicar a equação (3.6) para definir o valor $R_{putrafo}$ (resistência do transformador em [pu]).

$$R_{putrafo} = \left(\frac{P_{base}}{P_{nom}} \right) * \left(\frac{V_{nom}}{V_{base}} \right)^2 \quad (3.6)$$

O valor calculado de $R_{putrafo}$ é:

$$R_{putrafo} = 12,333 * 10^{-3}$$

Onde:

P_{base} : potência de base, escolhida própria potência do transformador (300 kVA);

V_{nom} : tensão elétrica nominal de linha do secundário, 380 V;

V_{base} : tensão elétrica de base, escolhida própria tensão elétrica do secundário (380 V).

A reatância percentual do transformador em ($X_{\%trafo}$) é calculado em (3.7), utilizando a impedância percentual do transformador ($Z_{\%trafo}$), extraída da Tabela 3.3.

$$X_{\%trafo} = \sqrt{Z_{\%trafo}^2 - R_{\%trafo}^2} \quad (3.7)$$

O valor calculado de $X_{\%trafo}$ é:

$$X_{\%trafo} = 43,277j * 10^{-3}$$

O valor em [pu] de $X_{putrafo}$ (reatância do transformador) é obtido a partir de (3.8).

$$X_{putrafo} = \left(\frac{P_{base}}{P_{nom}}\right) * \left(\frac{V_{nom}}{V_{base}}\right)^2 \quad (3.8)$$

O valor calculado de $X_{putrafo}$ é:

$$X_{putrafo} = 43,277j * 10^{-3}$$

Onde:

P_{base} : potência de base, escolhida própria potência do transformador (300 kVA);

V_{nom} : tensão elétrica nominal de linha do secundário, 380 V;

V_{base} : tensão elétrica de base, escolhida própria tensão elétrica do secundário (380 V).

Em seguida, determina-se a impedância do condutor que liga o transformador até o quadro geral de baixa tensão elétrica (QGBT) (\bar{Z}_{puc1}) na Figura 3.2 utilizando (3.9). A partir da planta elétrica, determina-se as bitolas dos condutores fase que é de 300 mm², neutro é 150 mm² e do terra é 150 mm².

A impedância do primeiro trecho que liga o transformador ao QGBT em [pu] (\bar{Z}_{puc1}) é dado por (3.14):

$$\bar{Z}_{puc1} = R_{puc1} + X_{puc1} \quad (3.9)$$

O valor calculado de \bar{Z}_{puc1} é:

$$\bar{Z}_{puc1} = (4,056 + 5,547j) * 10^{-3}$$

Para dimensionar a resistência do condutor R_{c1} (Ω) que conecta o transformador até o QGBT, recorre-se a (3.10).

$$R_{c1} = R_1 * \frac{L_{c1}}{N_{c1}} \quad (3.10)$$

Aplicando os valores de R_1 , L_{c1} e N_{c1} em (3.10), tem-se:

$$R_{c1} = 1,952 * 10^{-3}$$

Onde:

R_1 : resistência média do condutor utilizado na instalação em Ohm, disponível na Tabela 3.1;

L_{c1} : comprimento do condutor em [m] que conecta o transformador até o QGBT;

N_{c1} : número de condutores em paralelo que conecta o transformador até o QGBT.

Para converter para pu o valor de R_{c1} calculado em (3.10) é necessário calcular a impedância de base (Z_{base}) na equação (3.11).

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{P_{base}} \quad (3.11)$$

Aplicando os valores de V_{base} e P_{base} em (3.11), tem-se:

$$Z_{base} = 481,333 * 10^{-3}$$

Para converter R_{c1} de Ohm para [pu], utiliza-se (3.12).

$$R_{puc1} = \frac{R_{c1}}{Z_{base}} \quad (3.12)$$

O valor calculado em [pu] de R_{puc1} é:

$$R_{puc1} = 4,056 * 10^{-3}$$

Onde:

R_{puc1} : resistência do condutor em [pu], que conecta o transformador até o QGBT;

De modo similar que foi obtida a resistência R_{c1} , a reatância do condutor em Ohm que liga o transformador até o QGBT (X_{c1}) é determinada por (3.13).

$$X_{c1} = X_1 * \frac{L_{c1}}{N_{c1}} \quad (3.13)$$

Aplicando os valores de X_1 , L_{c1} e N_{c1} em (3.13), tem-se o valor em Ohm.

$$X_{c1} = 2,67j * 10^{-3}$$

Onde:

X_1 : reatância média do condutor utilizado na instalação em Ohm, disponível na Tabela 3.1.

Para transformar a reatância X_{c1} de Ohm para $[pu]$, utiliza-se o valor de X_{c1} calculado em (3.13) na equação (3.14).

$$X_{puc1} = \frac{X_{c1}}{Z_{base}} \quad (3.14)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.13) e (3.11), aplicando em (3.14) obtém-se o valor de X_{puc1} em $[pu]$.

$$X_{puc1} = 5,547j * 10^{-3}$$

Onde:

X_{puc1} : resistência do condutor em $[pu]$, que conecta o transformador até o QGBT.

Na sequência para a modelagem, junto aos condutores que chegam ao QGBT, existem também os barramentos utilizados nesse QGBT.

Portanto, o próximo passo é a modelagem dos barramentos, com metodologia similar ao cálculo realizado para o condutor. Para o cálculo das resistências e reatâncias, foi baseado em estimativa da corrente elétrica que flui pelo circuito baseado na capacidade de condução do condutor, estimou-se também a quantidade de barras por fase, considerado uma por fase.

A análise da capacidade de condução da corrente elétrica foi realizada com o auxílio da NBR 5410/2004 e os valores de resistência e reatância foram extraídos da Tabela 3.2, disponível em MAMEDE FILHO (2010). O valor de impedância do barramento do QGBT, em $[pu]$

(\bar{Z}_{pub1}) utilizado para o dimensionamento foi calculado para a barra de $50mm \times 10mm$, barra sem pintura, semelhante ao que existe no quadro geral da instalação elétrica.

A \bar{Z}_{pub1} é calculado a partir da equação (3.15):

$$\bar{Z}_{pub1} = R_{pub1} + X_{pub1} \quad (3.15)$$

$$\bar{Z}_{pub1} = (213,375 + 443,3j) * 10^{-3}$$

A resistência do barramento em ohm do QGBT (R_{b1}) é calculado por (3.16) com o valor de resistência média do barramento utilizado no QGBT em Ohm (R_{barr1}) coletada da Tabela 3.2.

$$R_{b1} = R_{barr1} * \frac{L_{b1}}{N_{b1}} \quad (3.16)$$

Aplicando os valores de R_{barr1} , L_{b1} e N_{b1} em (3.16), tem-se o valor em $[\Omega]$.

$$R_{b1} = 54,75 * 10^{-6}$$

Onde:

L_{b1} : comprimento do barramento em [m] do QGBT;

N_{b1} : número de barras em paralelo por fase no QGBT.

Para converter R_{b1} em $[\Omega]$, calculado em (3.16) para $[pu]$ (R_{pub1}), é calculado a partir da equação (3.17).

$$R_{pub1} = \frac{R_{b1}}{Z_{base}} \quad (3.17)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.17) e (3.11), aplicando em (3.17) obtém-se o valor de R_{pub1} em $[pu]$.

$$R_{pub1} = 113,747 * 10^{-6}$$

De modo similar que foi obtida a resistência R_{b1} , a reatância do barramento em Ohm do QGBT (X_{b1}) é determinada por (3.18).

$$X_{b1} = X_{barr a1} * \frac{L_{b1}}{N_{b1}} \quad (3.18)$$

Aplicando os valores de $X_{barr a1}$, L_{b1} e N_{b1} em (3.18), tem-se o valor em $[\Omega]$.

$$X_{b1} = 213,375j * 10^{-3}$$

Onde:

$X_{barr a1}$: reatância média do barramento utilizado no QGBT em Ohm, disponível na Tabela 3.2;

Para transformar a reatância X_{b1} de $[\Omega]$ para $[pu]$, utiliza-se o valor calculado em (3.18) de X_{b1} na equação (3.19).

$$X_{pub1} = \frac{X_{b1}}{Z_{base}} \quad (3.19)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.18) e (3.11), aplicando em (3.19) obtém-se o valor de X_{pub1} em $[pu]$.

$$X_{pub1} = 443,3j * 10^{-6}$$

Segundo a Figura 3.2 o próximo ponto a ser dimensionado é a impedância do trecho entre o QGBT até o QLF LE em $[pu]$ (\bar{Z}_{puc2}), utilizando a equação (3.20), e as bitolas de fase, neutro e terra de 10 mm^2 .

$$\bar{Z}_{puc2} = R_{puc2} + X_{puc2} \quad (3.20)$$

$$\bar{Z}_{puc2} = (69,248 + 3,761j) * 10^{-3}$$

Para determinar a resistência do condutor R_{c2} (Ω) que conecta o QGBT até o QLF LE, recorre-se a equação (3.21).

$$R_{c2} = R_2 * \frac{L_{c2}}{N_{c2}} \quad (3.21)$$

Aplicando os valores de R_2 , L_{c2} e N_{c2} em (3.21), tem-se o valor em $[\Omega]$.

$$R_{c2} = 33,332 * 10^{-3}$$

Onde:

R_2 : resistência média do condutor utilizado na instalação em Ohm, disponível na Tabela 3.1;

L_{c2} : comprimento do condutor em [m] que conecta o QGBT até o QLF LE;

N_{c2} : número de condutores em paralelo que conecta o QGBT até o QLF LE.

Para converter R_{c2} para [pu], aplica-se a (3.22).

$$R_{puc2} = \frac{R_{c2}}{Z_{base}} \quad (3.22)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.21) e (3.11), aplicando em (3.22) obtém-se o valor de R_{puc2} em [pu].

$$R_{puc2} = 69,248 * 10^{-3}$$

Onde:

R_{puc2} : resistência do condutor em [pu], que conecta o QGBT até o QLF LE.

Em seguida, da mesma forma que foram obtidos os valores para a resistência, serão obtidos os valores para a reatância do condutor que conecta o QGBT até o QLF LE;

De modo equivalente ao qual foi obtida a resistência R_{c2} , a reatância em Ohm que conecta o QGBT até o QLF LE (X_{c2}) é determinada por (3.23).

$$X_{c2} = X_2 * \frac{L_{c2}}{N_{c2}} \quad (3.23)$$

Aplicando os valores de X_2 , L_{c2} e N_{c2} em (3.23), tem-se o valor em [H].

$$X_{c2} = 1,811j * 10^{-3}$$

Onde:

X_2 : reatância média do condutor utilizado na instalação em Ohm, disponível na Tabela 3.1.

Transformando a reatância X_{c2} de [Ω] em [pu], utiliza-se o valor de X_{c2} calculado em (3.23) na equação (3.24).

$$X_{puc2} = \frac{X_{c2}}{Z_{base}} \quad (3.24)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.23) e (3.11), aplicando em (3.24) obtém-se o valor de X_{puc2} em $[pu]$.

$$X_{puc2} = 3,761 * 10^{-3}$$

Onde:

X_{puc2} : resistência do condutor em $[pu]$, que conecta o QGBT até o QLF LE.

Na sequência para o cálculo, da impedância dos condutores que chegam ao QLF LE, existem também a impedância relativa aos barramentos utilizados nesse QLF.

Para estimar a capacidade de condução do condutor de projeto do *campus*, baseado na NBR 5410/2004 e consulta dos valores de capacidades da corrente, resistência e reatância baseados na Tabela 3.2, de acordo com MAMEDE FILHO (2010).

Os valores de resistência e reatância utilizados são da barra $12mm \times 2mm$, barra sem pintura, semelhante ao que existe no quadro geral da instalação elétrica.

A impedância do barramento do QLF (\bar{Z}_{pub2}) em $[pu]$ é calculado a partir de (3.25):

$$\bar{Z}_{pub2} = R_{pub2} + X_{pub2} \quad (3.25)$$

$$\bar{Z}_{pub2} = (1,932 + 0,593j) * 10^{-3}$$

A resistência do barramento em Ohm do QLF (R_{b2}) é calculado por meio da equação (3.26).

$$R_{b2} = R_{barra2} * \frac{L_{b2}}{N_{b2}} \quad (3.26)$$

Aplicando os valores de R_{barra2} , L_{b2} e N_{b2} em (3.26), tem-se o valor em $[\Omega]$.

$$R_{b2} = 1,162 * 10^{-3}$$

Onde:

R_{barra2} : resistência média do barramento utilizado no QLF em Ohm, disponível na Tabela 3.2;

L_{b2} : comprimento do barramento em $[m]$ do QLF;

N_{b2} : número de barras em paralelo por fase no QLF.

Para converter R_{b2} calculado em (3.26) de $[\Omega]$ para $[pu]$ (R_{pub2}), é calculado a partir da equação (3.27).

$$R_{pub2} = \frac{R_{b2}}{Z_{base}} \quad (3.27)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.26) e (3.11), aplicando em (3.27) obtém-se o valor de R_{pub2} em $[pu]$.

$$R_{pub2} = 1,932 * 10^{-3}$$

Onde:

R_{pub2} : resistência da barra em $[pu]$, utilizado no QLF.

De modo similar que foi obtida a resistência R_{b2} , a reatância do barramento em Ohm do QLF (X_{b2}), é definida por (3.28).

$$X_{b2} = X_{barras2} * \frac{L_{b2}}{N_{b2}} \quad (3.28)$$

Aplicando os valores de $X_{barras2}$, L_{b2} e N_{b2} em (3.28), tem-se o valor em $[\Omega]$.

$$X_{b2} = 0,357j * 10^{-3}$$

Onde:

$X_{barras2}$: reatância média do barramento utilizado no QLF em Ohm, disponível na Tabela 3.2;

De modo análogo que foi obtida a resistência R_{pub2} , reatância da barra em $[pu]$ utilizada no QLF (X_{pub2}), é determinada por (3.29).

$$X_{pub2} = \frac{X_{b2}}{Z_{base}} \quad (3.29)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.28) e (3.11), aplicando em (3.29) obtém-se o valor de X_{pub2} em $[pu]$.

$$X_{pub2} = 0,593j * 10^{-3}$$

Último passo então, a partir da Figura 3.2, é dimensionar o condutor que liga o QLF à carga, em $[pu]$ (\bar{Z}_{puc3}), utilizando (3.30). Baseado na corrente elétrica de fase que percorre o circuito analisado, o condutor escolhido foram bitolas de 4 mm^2 .

$$\bar{Z}_{puc3} = R_{puc3} + X_{puc3} \quad (3.30)$$

$$\bar{Z}_{puc3} = (80,739 + 1,86j) * 10^{-3}$$

Para dimensionar a resistência do condutor R_{c3} (Ω) que conecta o QLF até a carga, utiliza-se (3.31).

$$R_{c3} = R_3 * \frac{L_{c3}}{N_{c3}} \quad (3.31)$$

Aplicando os valores de R_3 , L_{c3} e N_{c3} em (3.31), tem-se o valor de R_{c3} em $[\Omega]$:

$$R_{c3} = 38,863 * 10^{-3}$$

Onde:

R_3 : resistência média do condutor utilizado na instalação em Ohm, disponível na Tabela 3.1;

L_{c3} : comprimento do condutor em [m] que conecta o QLF até a carga;

N_{c3} : número de condutores em paralelo que conecta o QLF até a carga.

Para converter o valor de R_{c3} de $[\Omega]$ em $[pu]$ calculado em (3.31) é necessário utilizar o valor de Z_{base} calculado na equação (3.11) e aplicar em (3.32)

$$R_{puc3} = \frac{R_{c3}}{Z_{base}} \quad (3.32)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.31) e (3.11), aplicando em (3.32) obtém-se o valor de R_{puc3} em $[pu]$:

$$R_{puc3} = 80,739 * 10^{-3}$$

Onde:

R_{puc3} : resistência do condutor em [pu], que conecta o QLF até a carga;

De modo similar que foi obtida a resistência R_{c3} , a reatância X_{c3} do condutor em Ohm (reatância do condutor que liga o QLF até a carga) é determinada por (3.33).

$$X_{c3} = X_3 * \frac{L_{c3}}{N_{c3}} \quad (3.33)$$

Aplicando os valores de X_3 , L_{c3} e N_{c3} em (3.33), tem-se o valor de X_{c3} em [Ω]:

$$X_{c3} = 0,895j * 10^{-3}$$

Onde:

X_3 : reatância média do condutor utilizado na instalação em Ohm, disponível na Tabela 3.1;

Para transformar a reatância X_{c3} em [pu], utiliza-se o valor de X_{c3} calculado em (3.33) na equação (3.34).

$$X_{puc3} = \frac{X_{c3}}{Z_{base}} \quad (3.34)$$

Utilizando os valores obtidos em (3.33) e (3.11), aplicando em (3.34) obtém-se o valor de X_{puc3} em [pu].

$$X_{puc3} = 1,86j * 10^{-3}$$

Onde:

X_{puc3} : resistência do condutor em [pu], que conecta o QLF até a carga;

Após a determinação das impedâncias, a partir das resistências e reatâncias relativos a cada trecho, disposto até a carga, constata-se a impedância total (\bar{Z}_{total}) a partir da equação (3.35).

$$\bar{Z}_{total} = \bar{Z}_{uredz} + \bar{Z}_{putrafo} + \bar{Z}_{puc1} + \bar{Z}_{pub1} + \bar{Z}_{puc2} + \bar{Z}_{pub2} + \bar{Z}_{puc2} \quad (3.35)$$

Aplicando (3.35) com os valores de impedância dos trechos, tem-se:

$$\bar{Z}_{total} = 0,168 + 0,064j$$

Para o cálculo da resistência da linha em $[\Omega]$ (R_{linha}), aplica-se (3.36).

$$R_{linha} = Re(\bar{Z}_{total}) \quad (3.36)$$

$$R_{linha} = 168,423 \text{ m}\Omega$$

Aplica-se (3.37) para calcular a reatância da linha em $[\Omega]$ (X_{linha}).

$$L_{linha} = \frac{Im(\bar{Z}_{total})}{2*\pi*f} \quad (3.37)$$

$$L_{linha} = 168,3368 \text{ mH}$$

Onde:

R_{linha} : resistência equivalente do sistema em Ohm;

L_{linha} : indutância equivalente do sistema em $[H]$;

f : frequência do sistema elétrico;

Os valores apresentados para resistência e reatância apresentados ao final da seção 3.2.1 são valores baixos de impedância para uma instalação elétrica, sujeito a maiores distorções harmônicas.

O sistema analisado é um sistema fraco, associada com confiabilidade do sistema elétrico, que caracteriza um sistema fraco como aquele sujeito a maiores oscilações ou distúrbios.

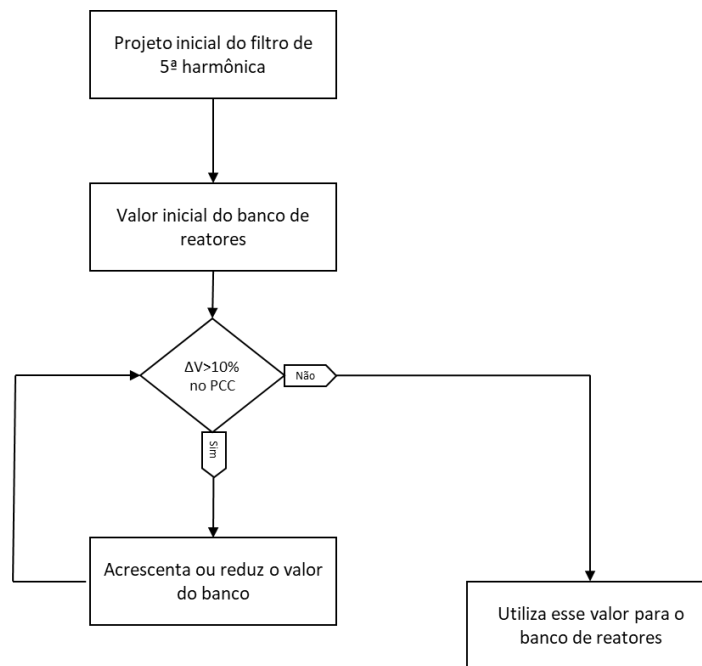
Em PEREIRA (1999), os valores para impedância da linha são superiores, e para isso, realizou-se o acréscimo de reatores de linha como em MORAIS (2011) e em DAS (2015). Para que as distorções harmônicas da corrente elétrica fossem mais simples de mitigar, houve a adição do banco de reatores (indutores).

A adição de reatores (impedância de linha) proposta na seção 3.2.3 vem da necessidade de reatância na linha calculada discutida na mesma seção. Em relação à projetos reais, houve uma diferença em relação a reatância, e para contornar esse problema, foi proposta a adição de reatores em série nas linhas, de modo a aumentar as reatâncias e permitir que o sistema seja

mais resistente às distorções harmônicas, ou seja, de tornar forte. Com o aumento da reatância, há uma diminuição na relação com a corrente elétrica de curto circuito que será apresentado o cálculo no capítulo em 4.

O procedimento realizado para o cálculo do banco de reatores está no esquemático apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Esquemático para cálculo do valor do banco de reatores.



Fonte: Autor.

3.3 Estudo e modelagem do filtro

3.3.1 Introdução à modelagem do filtro

Como discutido no capítulo 2, os filtros passivos têm menor custo e maior simplicidade de projeto, guiando a decisão pelo tipo de filtro a ser utilizado no trabalho. Foi escolhido o filtro passivo de sintonia única por ser o mais utilizado na indústria, de acordo com GONZÁLEZ e MCCALL (1987) e DAS (2015).

Uma das desvantagens desse modelo é o projeto do filtro para uma carga invariável, pois os elementos passivos têm pouca tolerância quanto a variação, DAS (2015). Um problema a ser considerado é a ressonância, que deve ser evitado com a utilização de um “fator de dessintonia” que está entre 3% até 15%, de acordo com o IEEE Std. 1531/2003.

Esse fator faz com que a frequência de ressonância do filtro passivo seja menor do que a ordem harmônica de filtragem, evitando assim que a frequência de ressonância fique próxima da frequência que se deseja filtrar, decorrendo de uma possível variação de parâmetros dada por envelhecimento de capacitor ou similar, LEÃO (2014) e DAS (2015).

3.3.2 Modelagem do filtro de sintonia única dessintonizado

Para realizar o projeto dos filtros passivos é necessário a obtenção de alguns parâmetros da instalação elétrica. Um dos parâmetros é a potência reativa disponível a ser instalada (Q_r) que é determinada por (3.38).

$$Q_r = P * (\tan(\sin^{-1} fp_0) - \tan(\sin^{-1} fp_1)) \quad (3.38)$$

Onde:

P : potência ativa da carga;

fp_0 : fator de potência antes da instalação do capacitor;

fp_1 : fator de potência após a instalação do capacitor;

Próximo parâmetro a ser calculado é o valor da reatância efetiva do filtro de ordem n (X_{fn}), segundo LEÃO (2014) e IEEE Std. 1531/2003, é dado por (3.39).

$$X_{fn} = \frac{V_{ff}^2}{Q_c} \quad (3.39)$$

Onde:

V_{ff} : tensão elétrica de linha do sistema em [V];

Q_c : potência reativa efetiva no filtro;

Consequente, o valor da capacitância a ser utilizada no filtro (C_n), é determinada pela equação (3.40).

$$C_n = \frac{h_{rn}^2 - 1}{h_{rn}^2 * 2 * \pi * f * X_{fn}} \quad (3.40)$$

Sendo,

$$h_{rn} = h_n - (h_{rn} * d) \quad (3.41)$$

Onde:

h_{rn} : ordem harmônica aplicado valor de dessintonia;

h_n : ordem harmônica para o qual deseja projetar o filtro;

d : fator de dessintonia, valor médio foi escolhido, 6%;

Em seguida é calculado o valor relativo ao indutor desse filtro passivo a partir de (3.42).

$$L_n = \frac{1}{h_{rn}^2 * (2 * \pi * f)^2 * C_n} \quad (3.42)$$

Onde:

L_n : valor da indutância a ser instalado para filtragem de ordem harmônica n ;

O último passo para o projeto do filtro harmônico de sintonia simples dessintonizado, será o cálculo da resistência. Essa resistência permite que haja maior atenuação, uma vez que a resistência no filtro de sintonia única aumenta a banda de passagem de filtragem. Esta é baseada em um fator de qualidade Q , que está relacionado à banda de filtragem. Seu valor pode variar de 20 a 80, e está relacionado com a frequência do sistema e qual a variação de frequência permitida para este sistema elétrico, embora para o projeto será adotado um valor conservador de $Q = 50$ sugerido por LEÃO (2014).

$$R_n = \frac{\sqrt{C_n L_n}}{Q} \quad (3.43)$$

Onde:

R_n : valor de resistência a ser instalado para filtragem de harmônica n ;

Q : fator de qualidade, adimensional e varia de 20 até 80;

3.4 Conclusão

A carga não linear foi utilizada para produzir uma taxa de distorção harmônica da corrente e tensão elétrica próxima à uma aplicação real, com valores de TDH fora dos limites normativos estabelecidos por normas nacionais e internacionais.

Foi apresentada a metodologia para a determinação dos parâmetros elétricos da linha da instalação elétrica.

Para realizar a compensação dos harmônicos da corrente e tensão elétrica, foi apresentado a metodologia utilizada no projeto do filtro passivo de sintonia única, utilizando o fator de dessintonia.

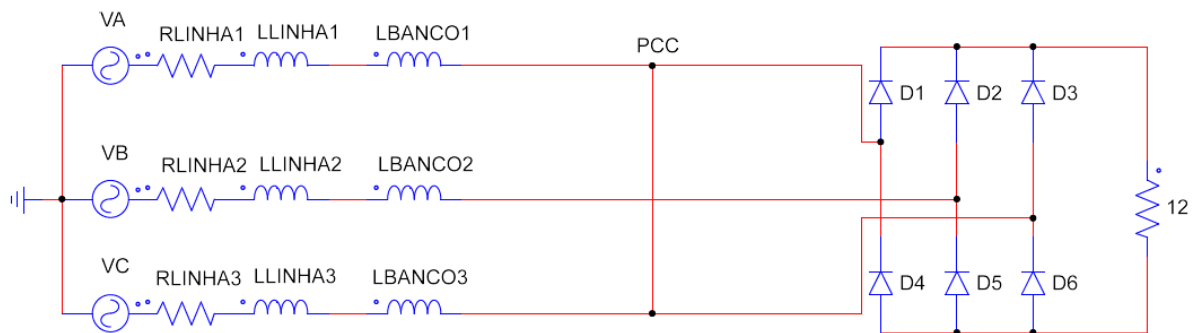
4 PROJETO FILTRO PASSIVO

4.1 Introdução

O sistema descrito no capítulo 3 apresenta o diagrama esquemático mostrado na Figura 4.1. O sistema elétrico é composto das impedâncias dos cabos, barramentos, impedância reduzida do sistema e impedância do transformador da subestação abaixadora relativas à instalação da planta da Universidade Federal do Ceará/ *Campus* de Sobral até um dos laboratórios e uma carga não linear.

Inicialmente será comentado sobre a carga e a instalação elétrica em questão, em seguida será realizado o projeto do filtro RLC série dessintonizado em paralelo com a carga não linear.

Figura 4.1 – Sistema elétrico analisado com PCC.



Fonte: Autor.

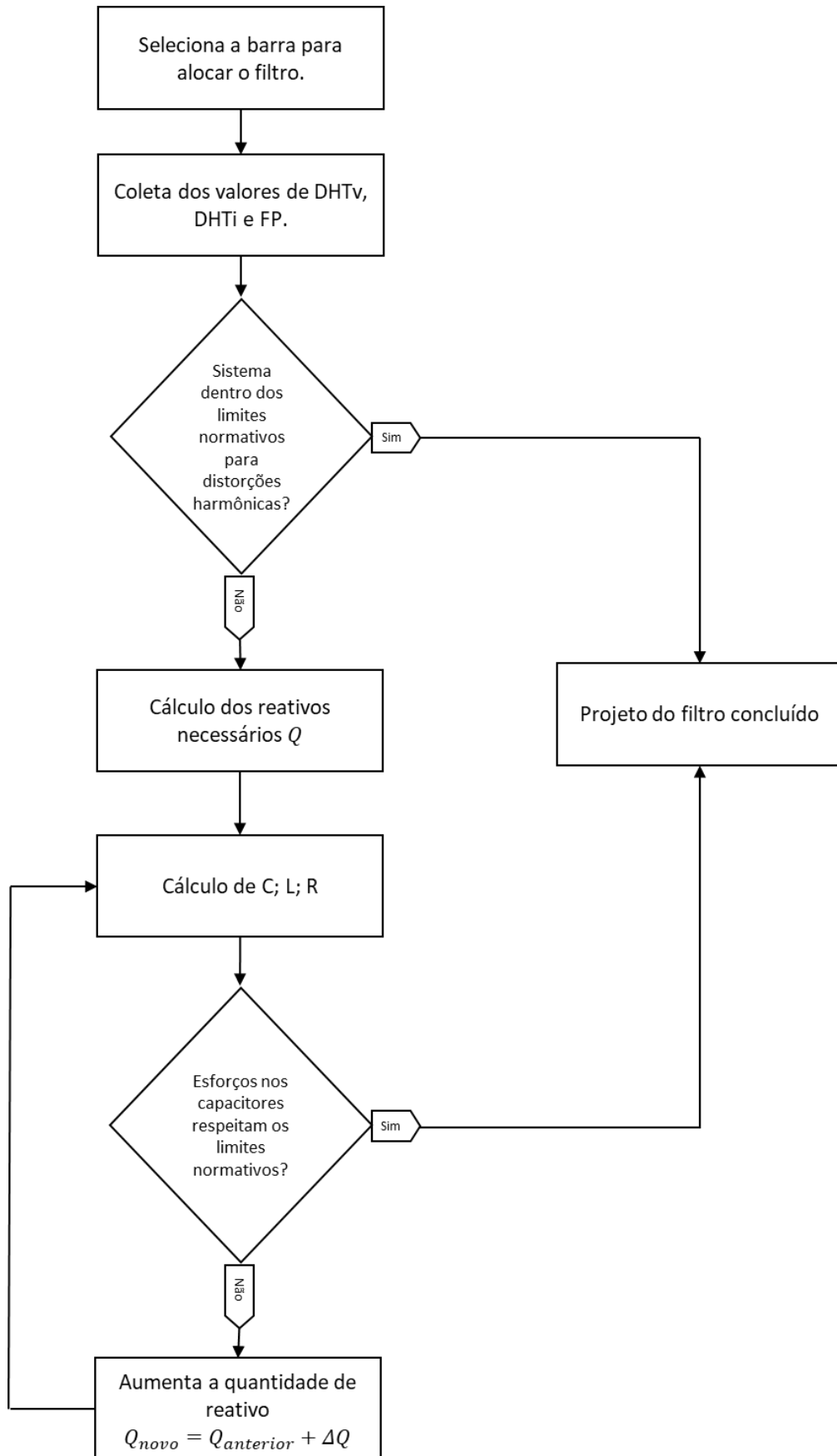
4.2 Projeto filtro passivo

Para o projeto destes filtros passivos, será necessária a consulta das Tabelas 4.1 e 4.2 extraídas da norma IEEE Std. 519/2014 para verificação de parâmetros de distorção harmônica estabelecidos em norma. Bem como, logo após serão testados o desempenho dos filtros harmônicos em relação a norma IEEE Std. 1531/2003, e relativos aos esforços suportados pelos capacitores em paralelo, na norma IEEE Std. 18/2018.

O sistema elétrico da Figura 4.1 é um sistema equilibrado. Deste modo, a análise pode ser realizada a partir de uma fase.

Os projetos dos filtros passivos utilizaram o diagrama apresentado na Figura 4.2.

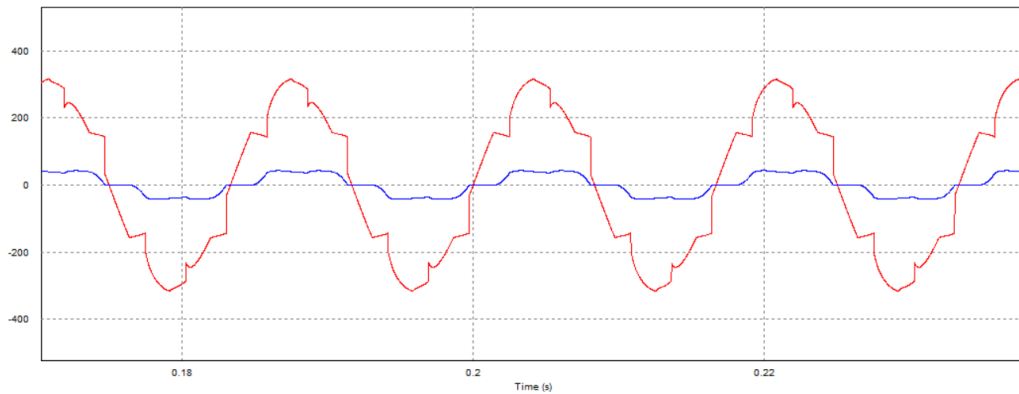
Figura 4.2 – Procedimento iterativo para cálculo do filtro passivo.



Fonte: Autor.

Após o cálculo dos valores das impedâncias (reatâncias e resistências) iniciais, tornou possível o levantamento por meio do software PSIM, estimar as distorções da rede para tensão elétrica e corrente elétrica elétrica sem filtros, com as formas de onda demonstradas na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Formas de tensão elétrica e corrente elétrica no PCC sem filtro.



Fonte: Autor.

Utilizando as funções disponíveis no PSIM, é possível extrair as informações relativas a taxa de distorção harmônica da corrente elétrica (TDH_i), taxa de distorção harmônica da tensão elétrica (TDH_v) e o fator de potência (FP).

Os valores percentuais de TDH_i e TDH_v e o fator de potência são:

$$TDH_i = 23,31\%$$

$$TDH_v = 13,47\%$$

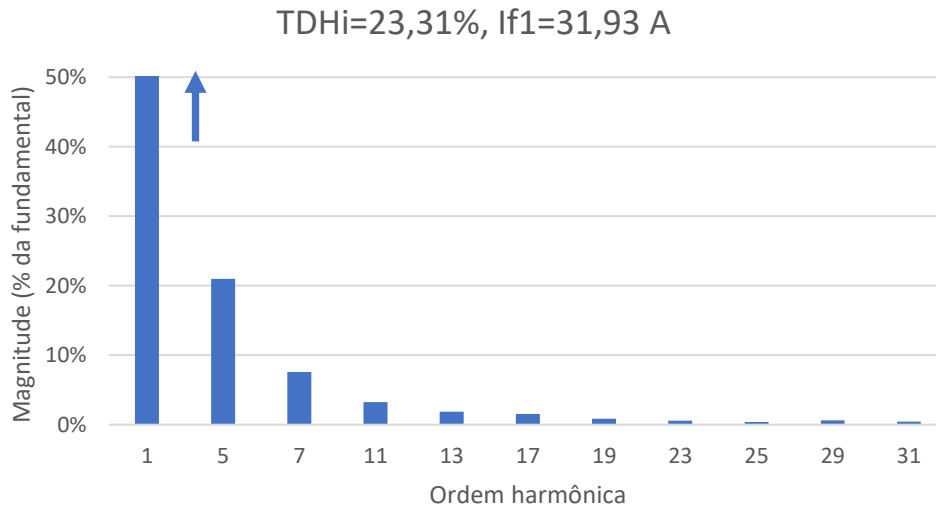
$$FP = 0,944$$

Além das distorções harmônicas geral, as normas também restringem as distorções harmônicas individuais, relativa a ordem harmônica n .

Os valores das distorções harmônicas individuais de TDH_i e TDH_v podem ser observados em porcentagem em relação a componente fundamental nos Gráficos 4.1 e 4.2.

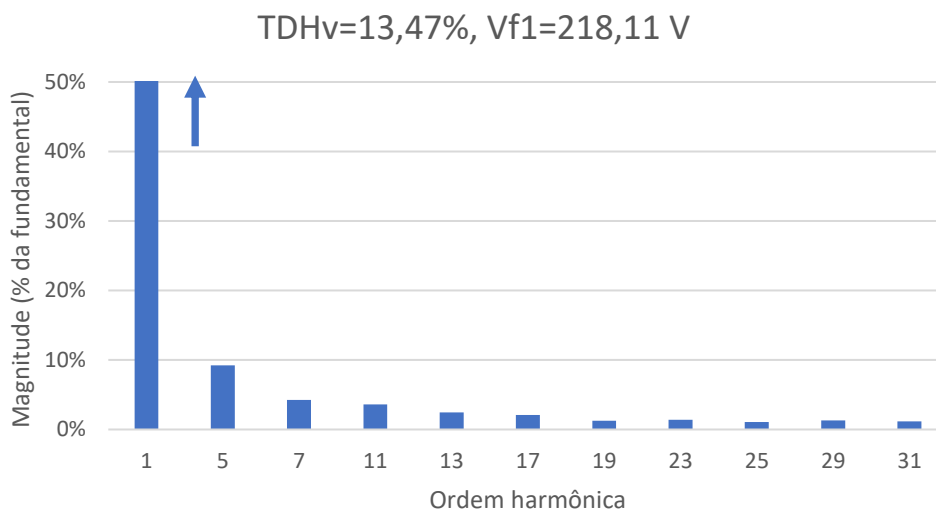
Os valores relativos as harmônicas apresentados não apareceram harmônicas triplas, ou seja, as múltiplas de 3ª ordem, pois o sistema é conetado a três fios e pelo tipo de carga utilizada. As harmônicas de ordem par não foram representadas pois estas não apresentaram valores significativos de distorção.

Gráfico 4.1 – Espectro harmônico da corrente elétrica, sem filtro em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

Gráfico 4.2 – Espectro harmônico da tensão elétrica, sem filtro em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

Uma das normas que este trabalho visa atender é a IEEE Std. 519/2014, que tem como parâmetros o limite da corrente elétrica, a Tabela 4.2. Onde, para utilizar a tabela, é necessário calcular a corrente elétrica de curto circuito eficaz, impedância da linha e a corrente elétrica eficaz da linha.

Tabela 4.1 – Limites de distorção harmônica de corrente elétrica para sistemas de baixa tensão elétrica (120V a 69kV eficaz).

I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	DHT
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: IEEE Std. 519/2014.

No PCC ilustrado na Figura 4.1 do sistema analisado, a impedância de rede elétrica é dada pela equação (4.1), calculada com os valores apresentados no capítulo 3.

Os parâmetros da linha elétrica R_{linha} , L_{linha} , X_{linha} e Z_{linha} são apresentados.

$$R_{linha} = 168,423 \text{ m}\Omega;$$

$$L_{linha} = 169,368 \text{ mH} + 1,5 \text{ mH};$$

Onde:

$$\omega = 2 * \pi * f, \text{ sendo que } f \text{ é } 60 \text{ Hz.}$$

$$|X_{linha}| = 629 \text{ m}\Omega;$$

$$Z_{linha} = R_{linha} + L_{linha} * j; \quad (4.1)$$

$$|Z_{linha}| = 0,651 \Omega;$$

Os valores eficazes de tensão e corrente elétrica fundamental no PCC são determinados por (4.2) e (4.3).

$$V_{linhaEficaz} = \frac{V_{pfundamental}}{\sqrt{2}}; \quad (4.2)$$

$$I_{linhaEficaz} = \frac{I_{pfundamental}}{\sqrt{2}}; \quad (4.3)$$

A relação da corrente elétrica de curto circuito eficaz sobre corrente elétrica de linha eficaz é dada por (4.4).

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{V_{sef}/Z_s}{I_L} \quad (4.4)$$

Substituindo os valores de V_{sef} , Z_s e I_L em (4.4), o valor da relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 10,49;$$

A partir da Tabela 4.2, verificou-se que $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é menor que 20. Segundo o Gráfico 4.1, o TDH da corrente elétrica está acima de 5%, não atendendo na norma IEEE. Observa-se as distorções harmônicas individuais de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 23^a, 25^a, 29^a e 31^a da corrente elétrica acima dos limites permitidos pela norma.

Segundo a norma IEEE, a tensão elétrica deve apresentar harmônicos individuais de tensão elétrica restritos a 5% e a distorção geral a 8%.

Tabela 4.2 – Limites de distorção harmônicos de tensão elétrica.

Tensão (V) no PCC do barramento	Harmônica individual (%)	Distorção harmônica total DHT (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV < $V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV < $V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5

Fonte: IEEE Std. 519/2014.

A partir do Gráfico 4.2 e da Tabela 4.2 que a TDH da tensão elétrica está acima de 8%, não atendendo a norma e a 5^a harmônica de tensão elétrica está acima de 5% do exigido na norma.

4.2.1 Projeto filtro passivo 5^a harmônica

Na seção 4.2, foi identificado que a componente harmônica da corrente elétrica de maior influência é a de 5^a ordem, assim o filtro passivo é projetado para a mitigação desta componente.

Utilizando (3.39), (3.41) e (3.42) definidas no capítulo 3, determina-se os valores de capacitância, indutância e resistência do filtro passivo, com o fator de qualidade fixado em $Q = 50$, de acordo com LEÃO *et al.* (2014).

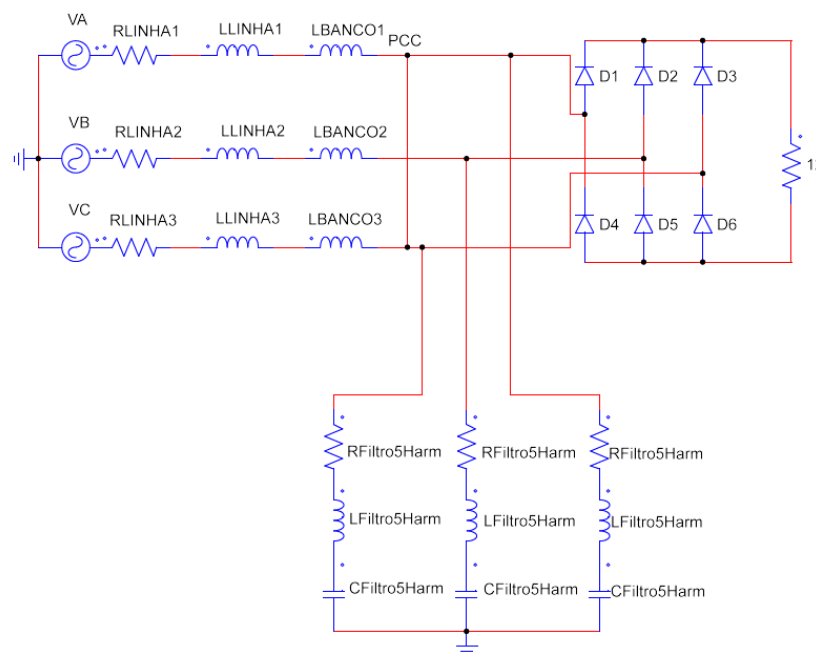
$$C_5 = \frac{h_{r5}^2 - 1}{h_{r5}^2 * 2 * \pi * f * X_{f5}} = 98,057 \mu F$$

$$L_5 = \frac{1}{h_{r5}^2 * (2 * \pi * f)^2 * C_5} = 3,051 \text{ mH}$$

$$R_5 = \frac{\sqrt{C_5 L_5}}{Q} = 10,938 \mu\Omega$$

Determinado os parâmetros do filtro passivo de 5ª ordem, a nova instalação elétrica com a presença do filtro passivo de 5ª ordem é mostrada na Figura 4.4.

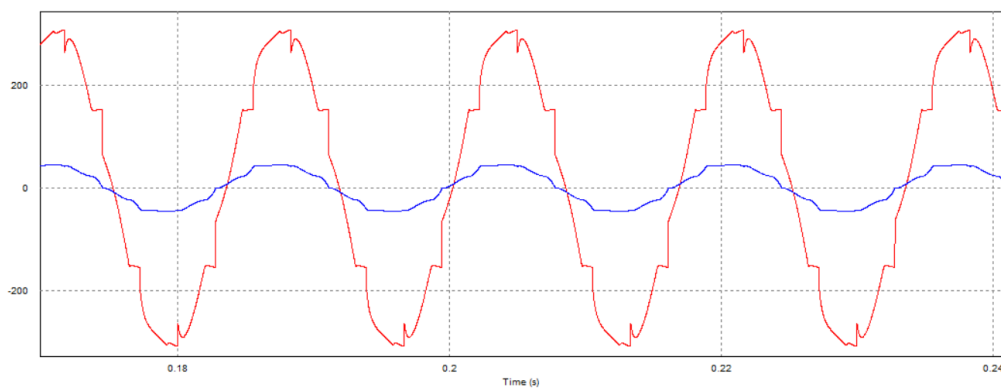
Figura 4.4 – Sistema analisado com filtro passivo de 5ª ordem.



Fonte: Autor.

As formas de ondas da corrente e tensão elétrica no PCC são mostradas na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Formas de tensão elétrica e corrente elétrica no PCC com filtro de 5ª harmônica.



Fonte: Autor.

Os novos valores obtidos utilizando o PSIM, para o sistema elétrico analisado com a adição do filtro passivo de 5ª ordem tem os resultados de TDHi, TDHv e FP:

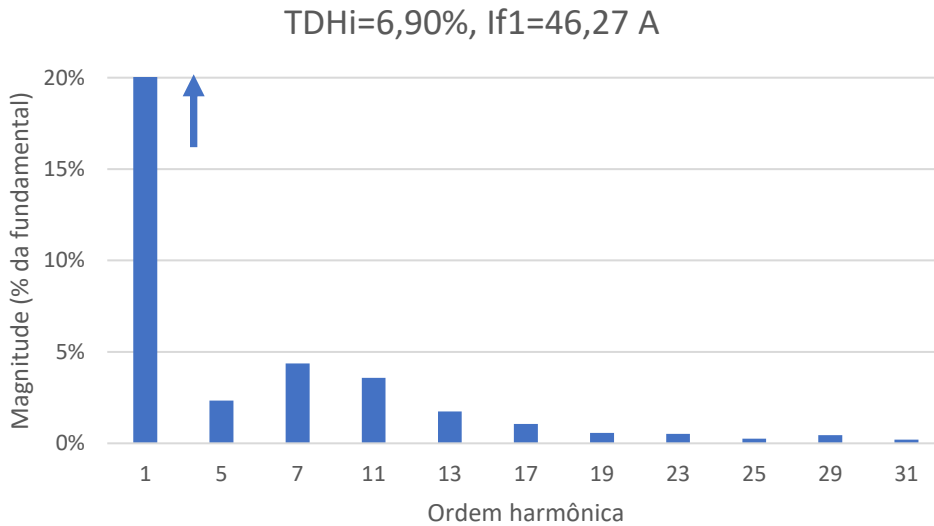
$$TDH_i = 6,90\%$$

$$TDH_v = 7,27\%$$

$$FP = 0,983$$

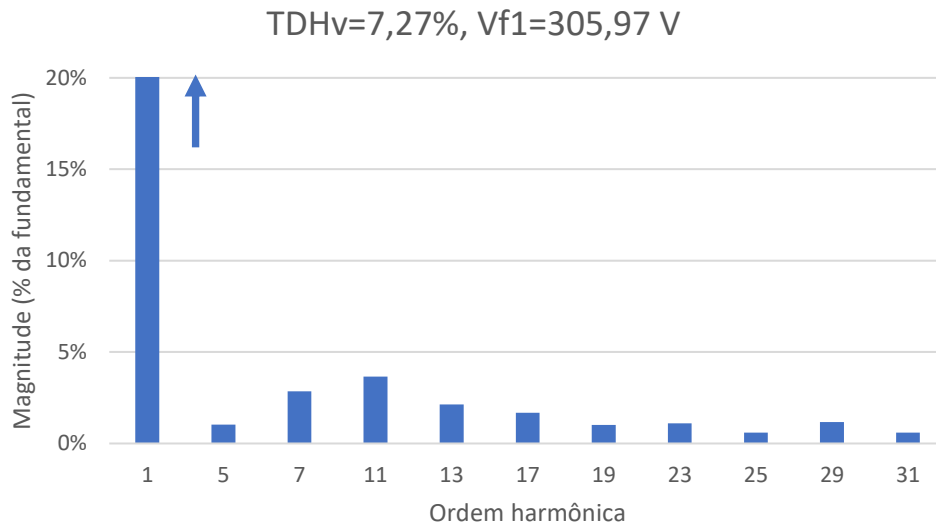
Os valores das distorções harmônicas individuais da corrente e tensão elétrica podem ser observados em porcentagem nos Gráficos 4.3 e 4.4.

Gráfico 4.3 – Espectro harmônico da corrente elétrica, com filtro 5ª ordem em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

Gráfico 4.4 – Espectro harmônico da tensão elétrica, com filtro 5ª ordem em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

Os valores eficazes de tensão elétrica e corrente elétrica fundamental no PCC são determinados por (4.2) e (4.3).

$$V_{linhaEficaz} = 216,35 \text{ V},$$

$$I_{linhaEficaz} = 32,71 \text{ A}.$$

Substituindo os valores de V_{sef} , Z_s e I_L em (4.4), o valor da relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 10,15;$$

A partir da Tabela 4.2, verifica-se que $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é menor que 20. O Gráfico 4.3 mostra que a TDH_i está acima de 5%, não atendendo a mesma a norma IEEE. Observa-se que as distorções harmônicas individuais de 7ª e 11ª ordens estão acima dos limites permitidos pela norma IEEE.

A partir do Gráfico 4.4, e da Tabela 4.3 verifica-se que o TDH_V está acima de 8%, não atendendo a norma.

Então, após verificado ainda a não conformidade com os requisitos ditados pelo IEEE Std. 519/2014, será projetado o filtro passivo para a próxima ordem harmônica, que é a sétima harmônica, será projetado o filtro para a mitigação desta.

4.2.2 Projeto filtro passivo 7ª harmônica

Na seção 4.2, foi identificado que a harmônica da corrente elétrica de maior influência é a componente de 7ª harmônica, embora na seção 4.2.1 seja realizado projeto do filtro passivo para a mitigação desta componente da 5ª ordem harmônica, não se obteve sucesso no atendimento das normas. Deste modo é necessário então seguir o projeto do filtro passivo de 7ª ordem.

Utilizando as equações (3.39), (3.41) e (3.42) definidas no capítulo 3, determina-se os valores de capacitância, indutância e resistência do filtro passivo de 7ª ordem.

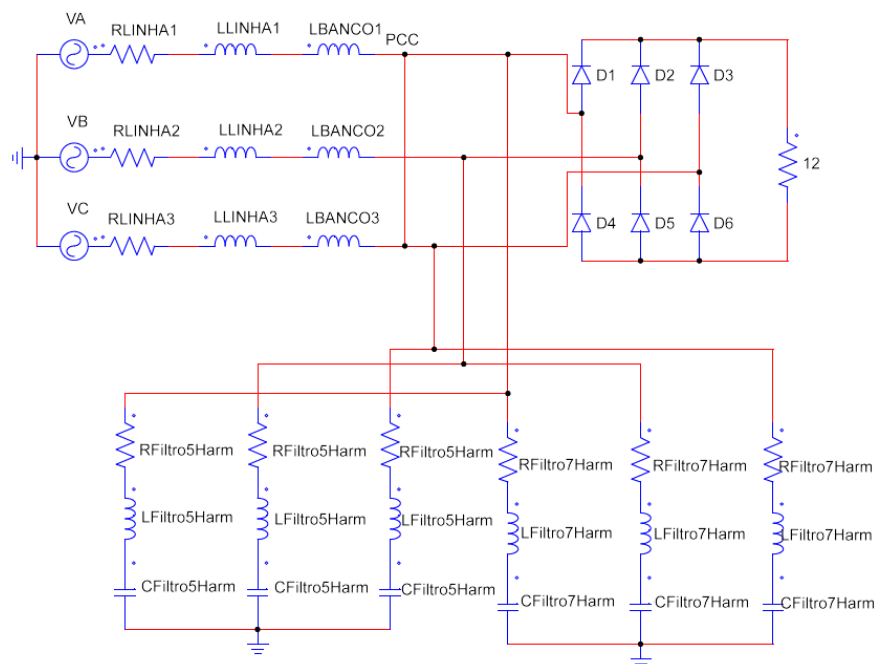
$$C_7 = \frac{h_{r7}^2 - 1}{h_{r7}^2 * 2 * \pi * f * X_{f7}} = 32,948 \mu F$$

$$L_7 = \frac{1}{h_{r7}^2 * (2 * \pi * f)^2 * C_7} = 4,932 mH$$

$$R_7 = \frac{\sqrt{C_7 L_7}}{Q} = 8,063 \mu\Omega$$

A nova instalação elétrica com a presença do filtro passivo de 5ª e 7ª ordem é mostrada na Figura 4.6.

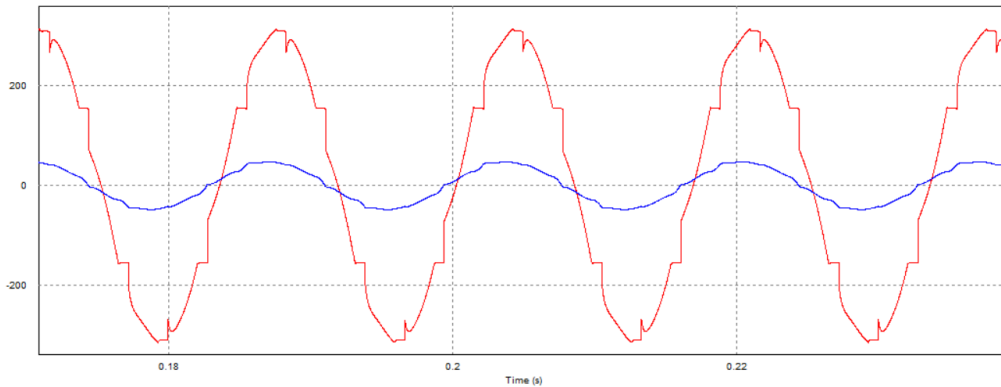
Figura 4.6 – Sistema analisado com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens.



Fonte: Autor.

As formas de onda da corrente e tensão elétrica no PCC para o sistema analisado com a presença dos filtros passivos de 5ª e 7ª ordem são mostradas na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Forma de tensão e corrente elétrica com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens.



Fonte: Autor.

Os novos valores obtidos utilizando o PSIM, para o sistema elétrico analisado com a adição dos filtros passivos de 5ª e 7ª ordens harmônicas tem os resultados de TDHi, TDHv e FP:

$$TDH_i = 4,99\%$$

$$TDH_v = 6,16\%$$

$$FP = 0,966$$

Os valores das distorções harmônicas individuais da corrente e tensão elétrica podem ser observados em porcentagem nos Gráficos 4.5 e 4.6.

Os valores eficazes de tensão e da corrente elétrica fundamental no PCC são determinados por (4.2) e (4.3).

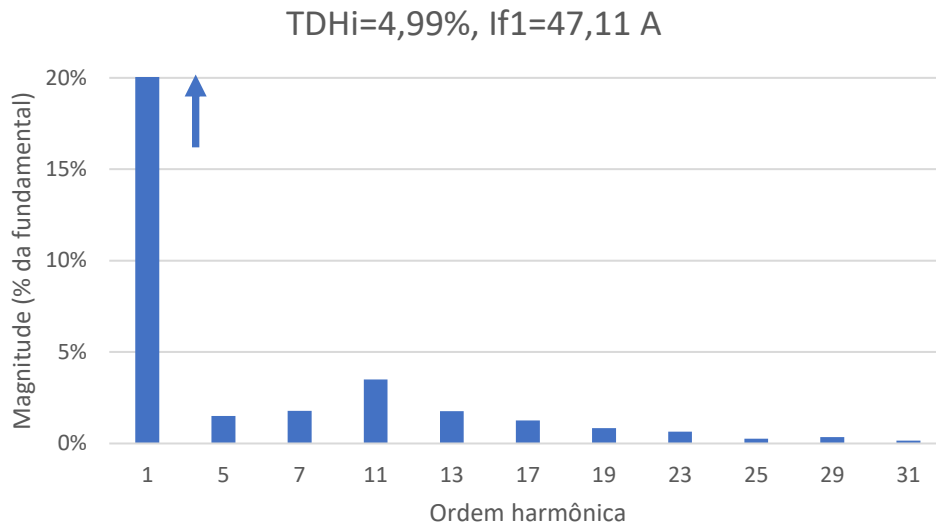
$$V_{linhaEficaz} = 214,93 \text{ V},$$

$$I_{linhaEficaz} = 33,3 \text{ A}.$$

Substituindo os valores V_{sef} , Z_s e I_L em (4.4), o valor da relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é:

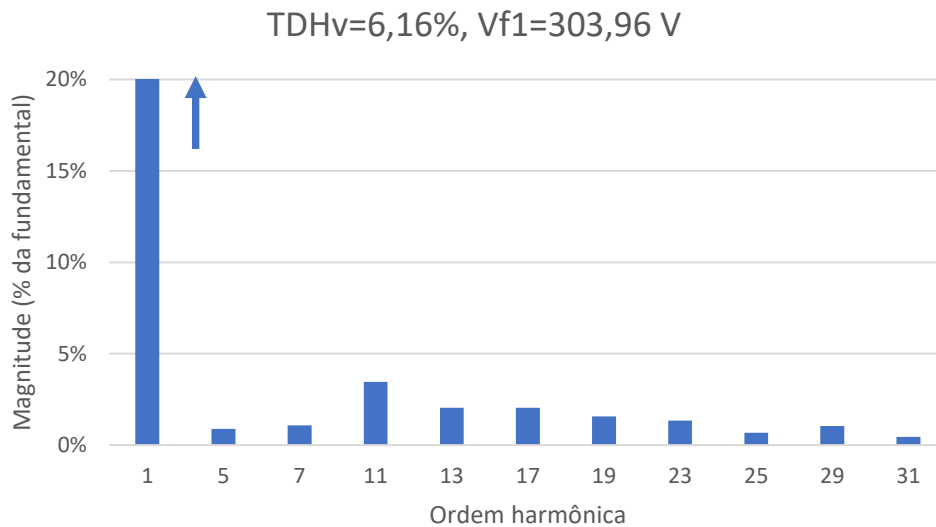
$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 9,91;$$

Gráfico 4.5 – Espectro harmônico da corrente elétrica, com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

Gráfico 4.6 – Espectro harmônico da tensão elétrica, com filtros passivos de 5ª e 7ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

A partir da Tabela 4.2, verificou-se que $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é menor que 20. O Gráfico 4.5 mostra que a TDH_i está dentro do exigido na norma IEEE. Embora a distorção harmônica individual de 11ª ordem, está acima do limite permitido por norma.

A partir do Gráfico 4.6, e da Tabela 4.3 verifica-se que o TDH_v está acima de 8%, não atendendo a norma.

Após a aplicação do filtro passivo harmônico de 5ª e 7ª ordem, não foi obtido o êxito esperado, não atendendo a norma IEEE Std. 519/2014. Logo deve ser projetado o filtro passivo para a próxima ordem harmônica, que é a 11ª ordem harmônica.

4.2.3 Projeto filtro passivo 11ª harmônica

Utilizando (3.39), (3.41) e (3.42) definidas no capítulo 3, determina-se os valores de capacitância, indutância e resistência do filtro passivo.

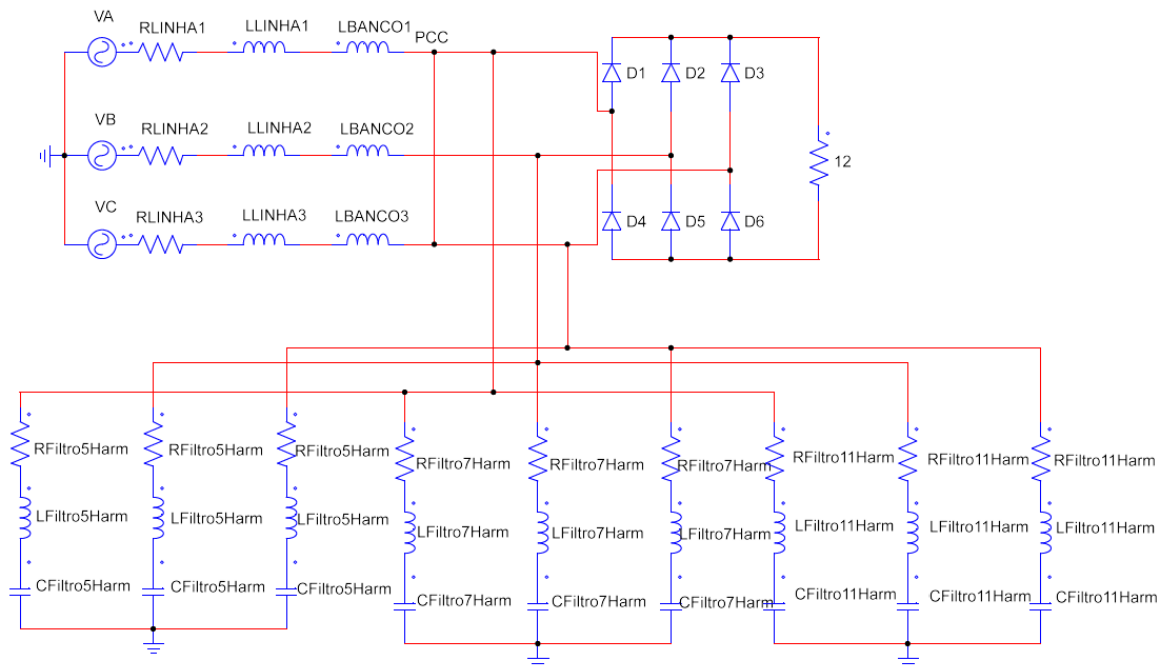
$$C_{11} = \frac{h_{r11}^2 - 1}{h_{r11}^2 * 2 * \pi * f * X_{f11}} = 17,075 \mu F$$

$$L_{11} = \frac{1}{h_{r11}^2 * (2 * \pi * f)^2 * C_{11}} = 3,854 mH$$

$$R_{11} = \frac{\sqrt{C_{11}L_{11}}}{Q} = 5,131 \mu\Omega$$

A nova instalação elétrica com a presença do filtro passivo de 5ª, 7ª e 11ª ordens é mostrada na Figura 4.8.

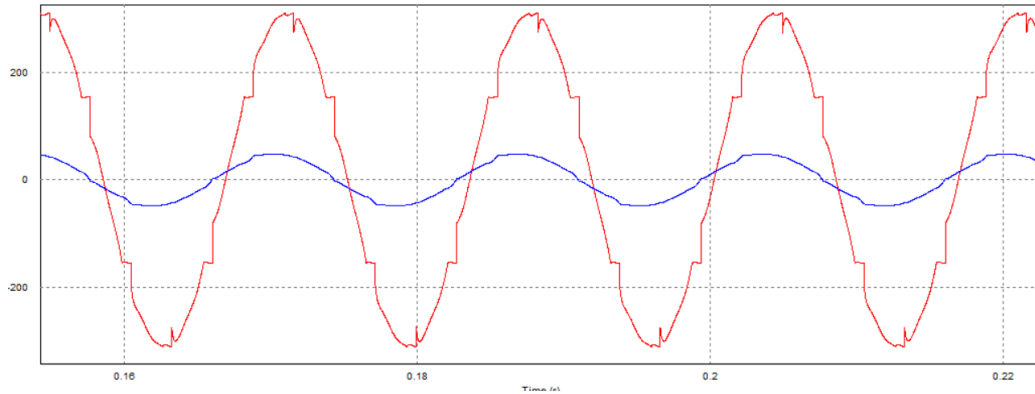
Figura 4.8– Sistema analisado com filtros passivos de 5ª, 7ª e 11 ordens.



Fonte: Autor.

As formas de onda da corrente e tensão elétrica no PCC para o sistema analisado com a presença dos filtros passivos de 5ª, 7ª e 11ª ordem são mostradas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Forma de tensão elétrica e corrente elétrica com filtro, de 5ª, 7ª e 11ª harmônica.



Fonte: Autor.

Os novos valores obtidos de TDHi, TDHv e FP por simulação do sistema elétrico analisado com a adição dos filtros passivos de 5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas tem os resultados:

$$TDH_i = 3,92\%$$

$$TDH_v = 4,9\%$$

$$FP = 0,9539$$

Os valores das distorções harmônicas individuais da corrente e tensão elétrica podem ser observados em porcentagem nos Gráficos 4.7 e 4.8.

Os valores eficazes de tensão e da corrente elétrica fundamental aplicando (4.2) e (4.3) no PCC são:

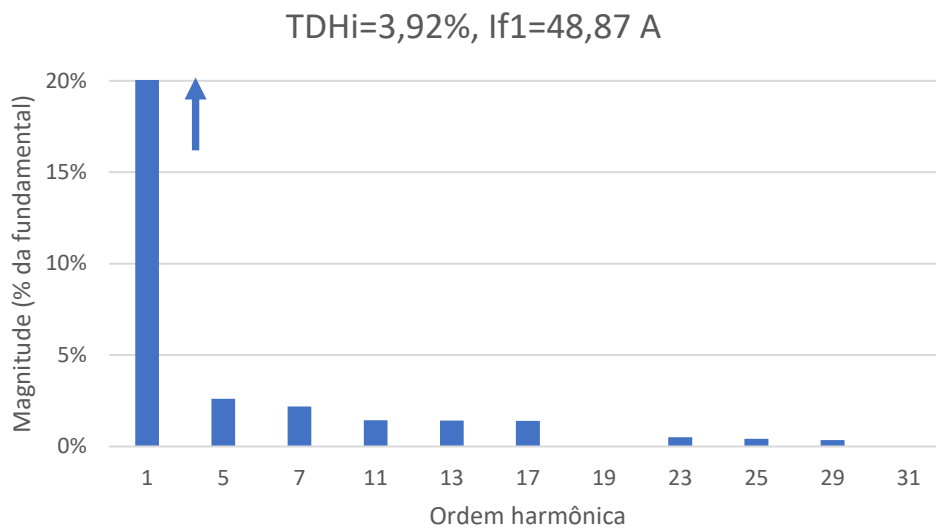
$$V_{linhaEficaz} = 219,56 V,$$

$$I_{linhaEficaz} = 34,55 A.$$

Substituindo os valores de V_{sef} , Z_s e I_L em (4.4), o valor da relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é:

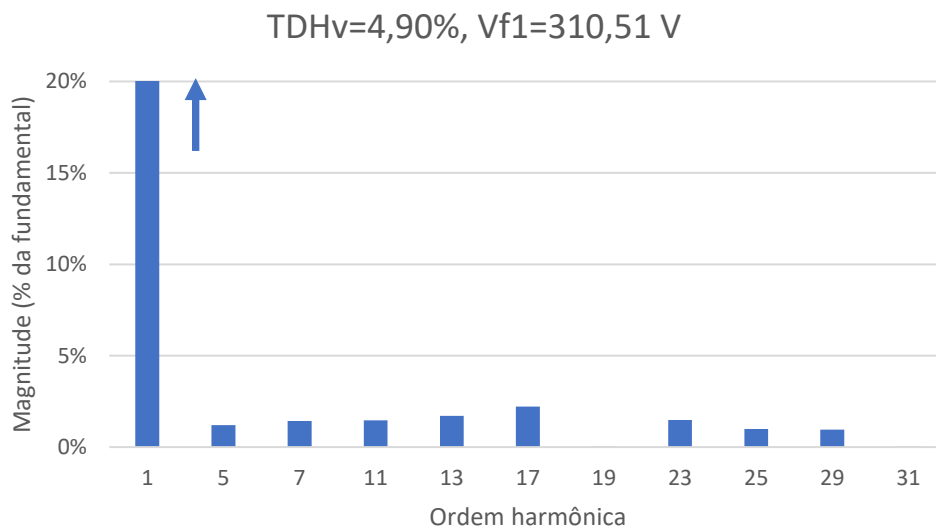
$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 9,76;$$

Gráfico 4.7– Espectro harmônico da corrente elétrica, com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

Gráfico 4.8 – Espectro harmônico da tensão elétrica com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens em valores percentuais relativos à fundamental.



Fonte: Autor.

A partir da Tabela 4.2, verifica-se que $\frac{I_{SC}}{I_L}$ é menor que 20. Segundo o Gráfico 4.7 mostra que a o TDH_i , juntamente com a distorção harmônica individual estão dentro dos limites exigidos na norma IEEE.

A partir do Gráfico 4.8, e da Tabela 4.3 verifica-se que o TDH_v está dentro dos limites estabelecidos na norma, bem como os limites individuais de tensão elétrica harmônica.

O sistema elétrico analisado está de acordo com os limites harmônicos totais e individuais da norma IEEE Std. 519/2014 e fator de potência exigido pela NT001/2012 ENEL.

Há também um parâmetro especificado no IEEE Std. 519/2014 que rege os limites para *notch* da tensão elétrica, regidos pela Tabela 4.7.

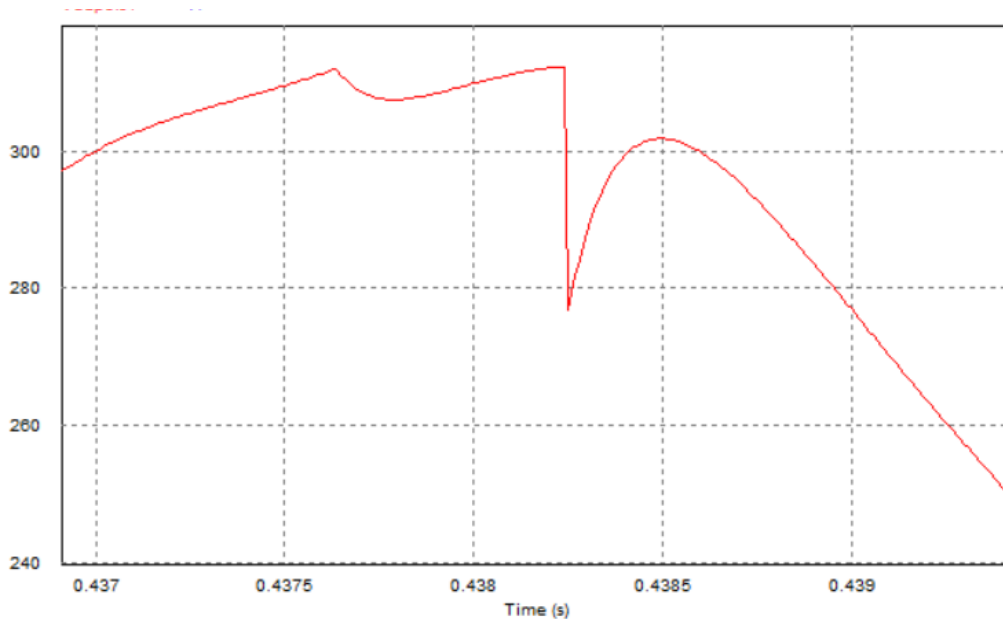
Tabela 4.3 – Limites recomendados em comutações, notches.

	Aplicações especiais	Sistemas comuns	Sistemas dedicados
Profundidade do <i>notch</i>	10%	20%	50%
Área do <i>notch</i>	16400	22800	36500

Fonte: IEEE Std. 519/2014.

Ao fim dos projetos dos filtros passivos de 5^a, 7^a e 11^a ordens, foi constatado um *notch* na forma de onda da tensão elétrica, ilustrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Ilustração do *notch* na onda de tensão elétrica.



Fonte: Autor.

Baseado nos tipos de cargas (sensíveis, perturbadoras ou críticas), o sistema não se classifica em aplicações especiais, também não nos sistemas dedicados, restando assim o sistema comum, conforme a Tabela 4.3. Como o sistema é um sistema comum, a norma permite que apresente uma profundidade de até 20% no *notch*.

Para determinar essa profundidade, utiliza-se a equação (4.5).

$$\text{Profundidade do dente: } \frac{p1-p2}{220} * 100 \quad (4.5)$$

Aplicando (4.5) com o auxílio do PSIM para determinar os pontos de mínimo e de máximo do *notch*, tem-se a profundidade de dente de 16%.

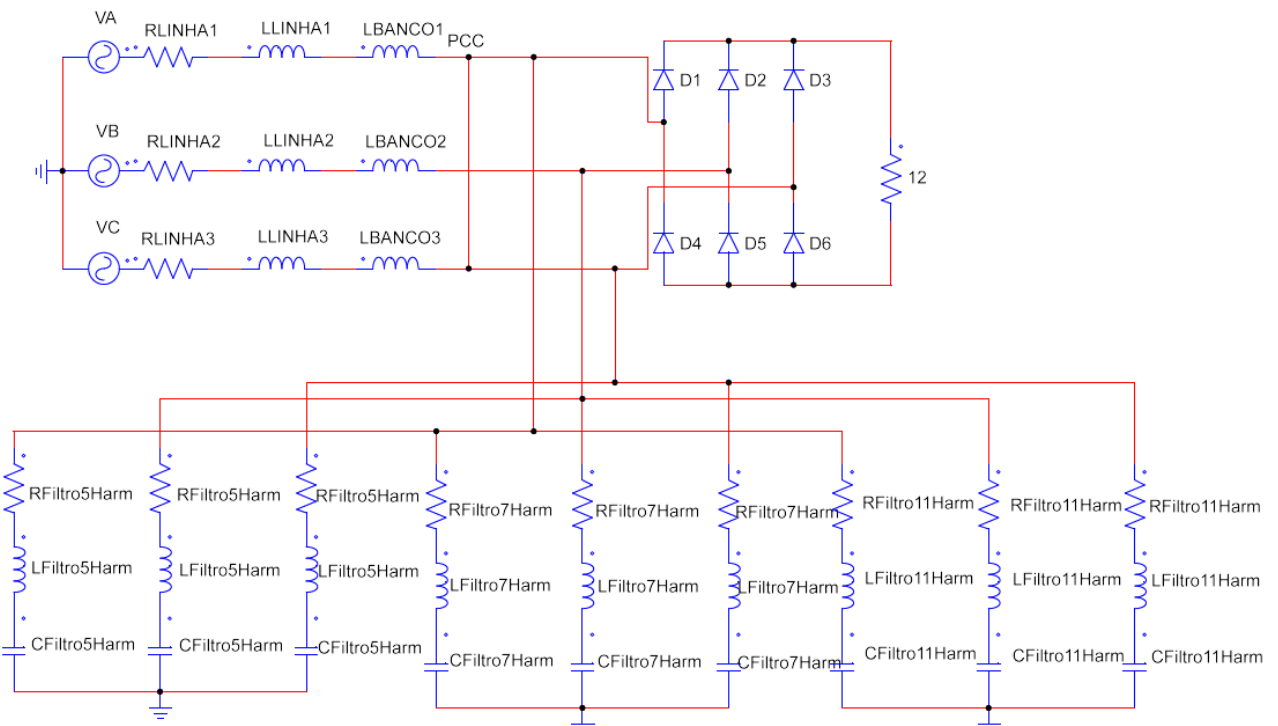
$$\text{Profundidade do dente: } \frac{p1-p2}{220} * 100 = \frac{312,27-277,05}{220} * 100 = 16\%$$

O valor de 16% calculado utilizando (4.5) está de acordo com a norma, de acordo com a Tabela 4.7.

A área do *notch* não foi possível medir utilizando ferramentas disponíveis no PSIM, pois o osciloscópio disponível no software não disponibiliza tal recurso.

Resultando então o sistema da Figura 4.7 com os filtros passivos projetados de 5ª, 7ª e 11ª ordens.

Figura 4.11 – Sistema elétrico com os filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens.



Fonte: Autor.

4.3 Teste de desempenho do projeto de filtro passivo

Segundo as diretrizes definidas na seção 2.3 sobre as normas IEEE Std. 1531/2003 e IEEE Std. 18/2018, o capacitor é o elemento mais sensível na construção dos filtros passivos e para garantir o bom funcionamento dos filtros, os capacitores devem atender quatro fatores:

4.3.1 110% da tensão elétrica nominal;

Em que será testado a capacidade de sobrecarga do capacitor, geralmente para uso em contingências. Destas contingências estão previstas sobretensões e situações de desbalanço. A tensão elétrica sobre o capacitor é determinada por (4.7).

$$V_r = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_C(h) \quad (4.7)$$

Onde:

V_r : valor eficaz da tensão elétrica do capacitor;

h : ordem harmônica;

$I(h)$: corrente elétrica eficaz harmônica do capacitor dada a ordem harmônica;

$X_C(h)$: reatância capacitiva dada a ordem harmônica.

Ou a tensão elétrica do capacitor pode ser determinada por (4.8).

$$V_r = V_c(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_C(h) \quad (4.8)$$

Se a corrente elétrica fundamental que flui pelo capacitor não tiver especificada, a tensão elétrica do capacitor é calculada por (4.9).

$$V_c(1) = V_s \left(\frac{h^2}{h^2-1} \right) \quad (4.9)$$

Onde:

$V_c(1)$: máxima tensão elétrica eficaz fundamental no capacitor;

V_s : máxima tensão elétrica do sistema pelo capacitor não incluindo o pico de tensão elétrica pelo indutor;

h : ordem harmônica para o filtro passivo de sintonia única das dessintonias (4,3; 4,7; etc.).

4.3.2 120% da tensão elétrica de pico de nominal;

Dentre esses itens são de especificações para as aplicações, tais como máxima tensão elétrica de linha de operação, frequência que está sintonizada, tipo de instalação, etc.

4.3.3 135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal;

O teste composto nesse item é para a operação em regime permanente. São as tensões harmônicas sobre o capacitor do filtro somado com a fundamental, onde na equação (4.10) determina-se o reativo necessário para cálculo da corrente nominal que percorre o capacitor, na equação (4.11). Aplicando a equação (4.12) para descobrir a corrente eficaz, que será utilizada para comparar com a corrente nominal calculada.

$$Q_{nominal} = \frac{(\sqrt{3}V_r)^2}{X_c} \quad (4.10)$$

$$I_{nominal} = \frac{Q_{rated}}{\sqrt{3}V_{nominal\ sistema}} \quad (4.11)$$

$$I_{eficaz} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I(h)^2} \quad (4.12)$$

Onde:

$Q_{nominal}$: potência nominal kVAR do banco capacitivo;

$I(h)$: corrente elétrica que percorre o filtro harmônico na harmônica h;

I_{eficaz} : corrente elétrica eficaz total do sistema;

4.3.4 135% kVAr nominal;

A corrente elétrica eficaz que flui pelo filtro harmônico capacitivo deve ser menor que 135% da corrente elétrica nominal baseado na potência reativa e na tensão elétrica nominal. A partir de (4.13) verifica-se o capacitor cumpre a norma.

$$|\sum_h^{\infty} V(h)I(h)| \leq |1.35Q_{rated}| \quad (4.13)$$

Onde:

$V(h)$: queda tensão elétrica pelo filtro harmônico capacitivo;

h : ordem harmônica (incluindo fundamental);

Apesar de existir parâmetros normatizados por instituições para os capacitores, não existe recíproca para os reatores (indutores). O que existe de mais próximo a IEEE Std. 18/2014, que define os esforços máximos suportados pelos capacitores, é a IEEE Std. C57.16/1996 que referencia anexo que guia para as aplicações de acordo com o aspecto construtivo dos indutores, os classificando e especificando limites para cada.

O presente trabalho não busca informações para os aspectos construtivos de indutores, tipos de isolamento, emissão de ruído, entre outros. Bem como para o resistor, também há uma pequena seção na norma IEEE Std. 1531/2003 que repassa especificações tais para como o indutor, porém a resistência representada no filtro passivo é utilizada por modelagem mais fiel relacionando as perdas dos outros componentes.

Com intenção de averiguar o enquadramento dos filtros passivos com as normas internacionais, as condições iniciais serão melhor analisadas.

Partindo da equação (4.8), retirado da norma IEEE Std. 18/2018.

$$V_r = V_c(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_c(h) \quad (4.14)$$

Temos que:

$$V_c(1) = I_f(1)X_c \quad (4.15)$$

Onde:

$I_f(1)$: corrente elétrica na frequência fundamental pelo filtro harmônico capacitivo;

X_c : reatância capacitiva na frequência fundamental;

Sendo a corrente elétrica fundamental dada por (4.16).

$$I_f(1) = \frac{V_s}{X_c - X_L} \quad (4.16)$$

Onde:

V_s : tensão elétrica submetida ao filtro harmônico capacitivo e indutivo;

X_c : reatância capacitiva na frequência fundamental;

X_L : reatância indutiva na frequência fundamental;

Os valores de X_c e X_L são determinados por (4.17) e (4.18), respectivamente.

$$X_c = \left(\frac{h_r}{h_r^2 - 1} \right) X_n \quad (4.17)$$

$$X_L = \frac{X_c}{h_r^2} \quad (4.18)$$

Onde:

X_n : reatância efetiva de acordo com a ordem harmônica projetada.

4.4 Teste de desempenho de projeto filtro passivo de 5ª ordem

Os parâmetros de cálculo foram apresentados, torna-se possível então a realização dos testes para verificar a conformidade de tais projetos de filtros passivos para com a norma internacional IEEE Std. 18/2014. Nos testes, serão averiguados os parâmetros das seções 4.3.1, 4.3.3 e 4.3.4.

4.4.1 110% da tensão elétrica nominal para filtro passivo de 5ª ordem

São determinados os parâmetros X_c e X_L a partir das equações (4.17) e (4.18).

$$X_c = \left(\frac{h_r}{h_r^2 - 1} \right) X_{eff} = 6,066 \Omega$$

$$X_L = \frac{X_c}{h_r^2} = 0,258 \Omega$$

Para se determinar a corrente fundamental, aplica-se a equação (4.16) da seção 4.3.1 com os valores obtidos em (4.17) e (4.18).

$$I_f(1) = \frac{V_s}{X_c - X_L} = 36,447 A$$

A tensão no capacitor, utilizando a equação (4.8) expresso na seção 4.3.1.

$$V_r = V_c(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_c(h) = 235,83 V$$

Assim, o capacitor ficará sujeito a uma tensão elétrica de 235,83 V, sendo que a tensão elétrica do sistema é 211,681 V e a margem permitida pela norma IEEE Std. 1531/2003 é 232,849 V. Logo a V_r está acima do requisito da norma, pois esta permite que o capacitor opere até 110% acima, embora tal condição deverá ser somente para contingências, e não para operação normal. A tensão obtida está 1% acima do que determinada a norma.

4.4.2 135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal para filtro passivo de 5ª ordem

Será aplicada a equação (4.12) para obter o valor da corrente eficaz, a equação (4.11) para determinar o valor do reativo nominal do filtro passivo e a equação (4.10) para o obter valor da corrente nominal pelo filtro passivo.

Utilizando a equação (4.12) obtém-se I_{eficaz} .

$$I_{eficaz} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I(h)^2} = 36,54 A$$

A partir de (4.11), obtém-se $Q_{nominal}$.

$$Q_{nominal} = \frac{(\sqrt{3}V_r)^2}{X_c} = 27507,02 VAr$$

A corrente nominal é calculada com base em (4.10).

$$I_{nominal} = \frac{Q_{rated}}{\sqrt{3}V_{nominal_{sistema}}} = 43,32 A$$

Observa-se que corrente elétrica eficaz do sistema que é 33,43 A é inferior a 135% da nominal, resultando em 58,94 A. Desta forma o projeto é viável no tópico 4.3.1.

4.4.3 135% kVAr nominal para filtro passivo de 5ª ordem

Terceiro tópico a ser verificado, através de manipulação da equação (4.13), tem-se:

$$\sum_h^{\infty} V(h)I(h) = 24282,5 VAr$$

Comparado com o resultado de $Q_{nominal}$ da equação (4.11) que é 27507,02 VAr, este respeita o requisito da norma IEEE Std. 1531/2003.

4.5 Teste de desempenho de projeto filtro passivo de 7º ordem

Da mesma forma da seção 4.4, serão testados somente três dos quatro parâmetros apresentados e verificados de 4.3.1 até 4.3.4.

4.5.1 110% da tensão elétrica nominal para filtro passivo de 7ª ordem

São determinados os parâmetros X_c e X_L a partir de (4.17) e (4.18).

$$X_c = \left(\frac{h_r}{h_r^2 - 1} \right) X_{eff} = 12,235 \Omega$$

$$X_L = \frac{X_c}{h_r^2} = 0,283 \Omega$$

Para se determinar a corrente fundamental, aplica-se (4.16) com os valores obtidos em (4.17) e (4.18).

$$I_f(1) = \frac{V_s}{X_c - X_L} = 18,168 A$$

A tensão no capacitor, utilizando a equação (4.8) expresso na seção 4.3.1.

$$V_r = V_c(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_c(h) = 226,001 V$$

O capacitor ficará sujeito a uma tensão elétrica de 226 V, sendo que a tensão elétrica do sistema é 217,123 V e como a margem permitida pela norma é até 238,835 V, assim a tensão no capacitor obedece a norma IEEE Std. 1531/2003.

4.5.2 135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal para filtro passivo de 7ª ordem

Será aplicada (4.12) para obter o valor da corrente eficaz, a equação (4.11) para determinar o valor do reativo nominal do filtro passivo e a equação (4.10) para obter o valor da corrente nominal pelo filtro passivo.

Utilizando a equação (4.12) obtém-se I_{eficaz} .

$$I_{eficaz} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I(h)^2} = 18,26 A$$

A partir de (4.11), obtém-se $Q_{nominal}$.

$$Q_{nominal} = \frac{(\sqrt{3}V_r)^2}{X_c} = 13772,4 \text{ VAr}$$

A corrente nominal é calculada com base em (4.10).

$$I_{nominal} = \frac{Q_{rated}}{\sqrt{3}V_{nominal\text{ sistema}}} = 21,1437 \text{ A}$$

Observa-se que corrente elétrica eficaz do sistema que é 18,26 A é inferior a 135% da nominal resultando em 28,54 A. Desta forma o projeto é viável no tópico c) da seção 4.3.

4.5.3 135% kVAr nominal para filtro passivo de 7ª ordem

Terceiro tópico a ser verificado, através de manipulação da equação (4.13), tem-se:

$$\sum_h^\infty V(h)I(h) = 12171 \text{ VAr}$$

Comparado com o resultado de $Q_{nominal}$ da equação (4.11) que é 13772,4 VAr, este respeita o requisito da norma IEEE Std. 1531/2003.

4.6 Teste de desempenho de projeto filtro passivo de 11º ordem

Da mesma forma da seção 4.4 e 4.5, serão testados somente três dos quatro parâmetros apresentados e verificados na seção 4.3.

4.6.1 110% da tensão elétrica nominal para filtro passivo de 11ª ordem

São determinados os parâmetros X_c e X_L a partir de (4.17) e (4.18).

$$X_c = \left(\frac{h_r}{h_r^2 - 1} \right) X_{eff} = 15,024 \Omega$$

$$X_L = \frac{X_c}{h_r^2} = 0,141 \Omega$$

Para se determinar a corrente fundamental, aplica-se (4.16) com os valores obtidos em (4.17) e (4.18).

$$I_f(1) = \frac{V_s}{X_c - X_L} = 18,317 \text{ A}$$

A tensão elétrica no capacitor é determinada por (4.8).

$$V_r = V_c(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_c(h) = 237,195 V$$

O capacitor ficará sujeito a uma tensão elétrica de 237,195 V, sendo que a tensão elétrica do sistema é 218,939 V e como a margem permitida pela norma é até 240,833 V, assim a tensão sobre o capacitor obedece a IEEE Std. 1531/2003.

4.6.2 135% da corrente elétrica nominal eficaz baseada no kVAr e na tensão elétrica nominal para filtro passivo de 11ª ordem

Será aplicada (4.12) para obter o valor da corrente eficaz, a equação (4.11) para determinar o valor do reativo nominal do filtro passivo e a equação (4.10) para obter o valor da corrente nominal pelo filtro passivo.

Utilizando a equação (4.12) obtém-se I_{eficaz} .

$$I_{eficaz} = \sqrt{\sum_1^{\infty} I(h)^2} = 18,26 A$$

A partir de (4.11), obtém-se $Q_{nominal}$.

$$Q_{nominal} = \frac{(\sqrt{3}V_r)^2}{X_c} = 20694,1 VAr$$

A corrente nominal é calculada com base em (4.10).

$$I_{nominal} = \frac{Q_{rated}}{\sqrt{3}V_{nominal_{sistema}}} = 23,338 A$$

Observa-se que corrente elétrica eficaz do sistema que é 18,26 A é inferior a 135% da nominal, resultando em 23,34 A. Desta forma o projeto é viável no tópico c) da seção 4.3.

4.6.3 135% kVAr nominal para filtro passivo de 11ª ordem

Terceiro tópico a ser verificado, através de manipulação da equação (4.13), tem-se:

$$\sum_h^{\infty} V(h)I(h) = 15151,7 VAr$$

Comparado com o resultado de $Q_{nominal}$ da equação (4.11) que é 20694,1 VAr, este respeita o requisito da norma IEEE Std. 1531/2003.

4.7 Conclusão

Inicialmente a instalação analisada continham distorções harmônicas da tensão de 13% e corrente elétrica de 23,31%. Após a aplicação do filtro passivo de 5ª harmônica, houve uma redução das distorções totais para 7% aproximadamente em ambas distorções, contanto estes ainda não respeitavam os limites estabelecidos pela norma IEEE Std. 519/2014.

Com a aplicação do filtro passivo de 5ª e 7ª ordem, TDH_V reduziu para 6% e a de TDH_i para 5%. Porém, ainda não satisfazendo por completo a norma, foi então projetado mais um filtro, o de 11ª ordem.

Com o acréscimo do filtro de 11ª ordem, a instalação elétrica com filtros passivos de 5ª, 7ª e 11ª ordens apresentam melhores resultados, respeitando assim os limites de distorções totais e individuais estabelecidos na norma IEEE Std. 519/2014, com distorção harmônica de tensão de aproximadamente 5% e distorção da corrente menor que 4%.

5 CONCLUSÃO FINAL E TRABALHOS FUTUROS

Inicialmente, foram apontados as motivações para a realização do presente trabalho, que fundamenta as necessidades frente à evolução de cargas que utilizam chaves de potência e a expansão na utilização destas, em conjunto à necessidade crescente de eficiência energética e vulnerabilidade dessas cargas mais sensíveis à distúrbios no sistema elétrico.

Foram levantados os comportamentos das cargas conectados no sistema elétrico, as características devido ao tipo de carga, comportamento relativo ao funcionamento e as harmônicas mais influentes, os efeitos, formas de mitiga-las e as normas que regem todo o contexto relacionado ao controle das harmônicas.

Aspectos construtivos de projeto para valores dos componentes desse filtro, tanto para capacitor, indutor e a resistência do filtro passivo de sintonia única dessintonizado. Durante o dimensionamento dos filtros passivos, foi observado a necessidade de acréscimo de filtros passivos, resultando no projeto de três filtros passivos para que o sistema elétrico estivesse de acordo com a norma IEEE Std. 519/2014.

Numa instalação industrial é possível observar com harmônicas de tensão e corrente elétricas. Para a instalação fictícia utilizada no trabalho, verificou-se através de simulações, distorções $TDH_V = 23,31\%$ e de $TDH_i = 13,47\%$.

Visando a conformidade da instalação com a norma IEEE 519/2014, foi projetado um filtro passivo de 5ª ordem harmônica. Houve uma redução expressiva nas distorções harmônicas apresentando $TDH_V = 6,9\%$ e $TDH_i = 7,27\%$. Contudo, a instalação elétrica ainda apresentava distorções harmônicas em desacordo com as normas.

Logo, adicionado ao filtro passivo de 5ª ordem, foi realizado o projeto de filtro passivo de 7ª ordem harmônica. Juntos, os filtros passivos de 5ª e 7ª ordens harmônicas conseguiram reduzir as harmônicas apresentando $TDH_V = 6,16\%$ e $TDH_i = 4,99\%$. Houve uma melhoria na qualidade de energia elétrica da instalação, embora as distorções permaneciam em desacordo com as normas IEEE, a distorção de uma das ordens harmônicas de corrente estava acima do esperado.

Para haver melhoria de desempenho dos projetos de filtros passivos, fez-se necessária a adição de mais uma ordem de filtro passivo. A instalação elétrica com os filtros passivos de 5ª,

7ª e 11ª ordens harmônicas obteve $TDH_V = 4,9\%$ e $TDH_i = 3,92\%$, estando adequada segundo as normas do IEEE e apresentando as melhores condições de desempenho e distorções na tensão e corrente elétrica.

A aplicação do projeto de filtros passivos demonstrou melhora na qualidade de energia elétrica da instalação estudada. Para haver a melhora foi necessária a adição de uma sequência de filtros passivos, que pode variar de acordo com características específicas de cada instalação.

5.1 Recomendação para trabalhos futuros

A instalação elétrica e a carga elétrica utilizada para o projeto dos filtros passivos no trabalho desenvolvido teve cunho fictício, recomenda-se a utilização de valores de distorções medidas em uma instalação industrial, utilizando analisador de energia para obter o comportamento da instalação em regime permanente durante um mês.

O levantamento da instalação elétrica com maior acurácia, utilizando valores mais precisos para a resistência e reatância da instalação. Aquisição para com a concessionária de energia elétrica de valores relacionados a corrente de curto circuito de entrada do ponto de conexão com a rede.

Pode-se implementar projeto de filtros ativos, utilizando parâmetros elétricos de instalação elétrica e distorções harmônicas detalhados, como evolução da abordagem ao problema relacionado as harmônicas no sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems – 2014. Std. 519. New York, 2014.

IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters – 2003. Std 1531. New York, 2003.

LEÃO, Ruth; SAMPAIO, R; ANTUNES, F; Harmônicos em Sistemas Elétricos. – 1. Ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 354 p.

KASSICK, E. V. (Santa Catarina). Universidade Federal de Santa Catarina: Departamento de Engenharia Elétrica Centro Tecnológico. **Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão**. Florianópolis, 2008. 132 p.

MAMEDE FILHO, João Mamede; *Instalações Elétricas Industriais*. 8 ed. Ceará: LTC, 2010.

ANJOS, Reginaldo Silva dos; BRITO, Mauricio Harley de; LEITE, Fabricio. Levantamento dos pontos de medição do ct_ufc_pici. Janeiro. Fortaleza, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5410*: resumos. Rio de Janeiro, 1997. 128 p.

NORMAS TÉCNICAS – COELCE. FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ALTA TENSÃO ELÉTRICA – 69 KV. NT-004/2011 R-05: resumos. Ceará, 2011. 69 p.

POMILIO, J.; DECKMANN, S M., “Distorção harmônica: causas, efeitos e soluções” Disponível em:<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a4.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2017, a.

POMILIO, J.; DECKMANN, S M., “Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas” Disponível em:<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2017, b.

TEIXEIRA, D. A. “Análise de distorções harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009, 114p.

DIAS, A. D; Harmônicos em sistemas industriais. – 2. Ed.- Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002. 284 p.

MORAIS, E. E. C. “Estudo e projeto de implementação de filtros passivos para atenuação de harmônicos em instalações elétricas industriais”, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2011, 137p.

OWEN, E. L., “A History of Harmonics in Power Systems”, IEEE Industry Applications Magazine. Janeiro / Fevereiro de 1998. pp. 6-12. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=644881>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

U.S. Energy Information Administration / International Energy Outlook 2016, “Industrial sector energy consumption”, cap 7. pp. 113-125. Disponível em:<<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/industrial.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

PEREIRA, Osvanil Oliveira. Estudo da Distorção Harmônica em um Sistema Trifásico de Baixa Tensão elétrica. Florianópolis: UFSC, 1999. 91p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GONZÁLEZ, D. A.; MCCALL, J. C., “Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems”, publicado na IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL APPLICATIONS, VOL. IA-23. NO. 3. Maio, 1987, páginas 504-511.

DAS, J. C.; Power system harmonics and passive filter design. – 1. Ed. – Estados Unidos: IEEE Press Editorial Board, 2015. 844 p.

DAS, J. C.; “Passive filters – Potentialities and Limitations”, publicado na IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL APPLICATIONS, VOL. 40. NO. 1. Janeiro, 2004, páginas 232-241.

CASTRO, Erasmo Saraiva de. Qualidade de energia elétrica: Fatores que influenciam a qualidade de energia elétrica. 13 mar. 2017, 14 jul. 2017. 4 p. Notas de Aula.

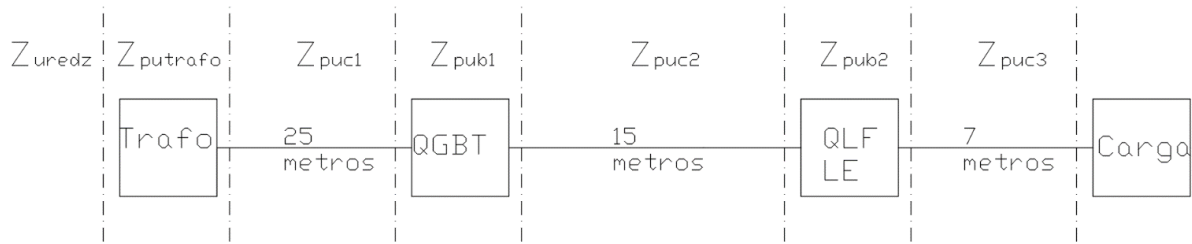
APÊNDICE A

(CÁLCULOS RELATIVOS À MODELAGEM DE LINHA DO SISTEMA SUPRIDOR)

A.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, baseada no sistema na Figura A.1, a impedância se faz necessário para a modelagem de como o sistema da universidade percebe a rede da concessionária de energia, ou seja, a impedância reduzida do sistema da concessionária. Para tal aproximação, segue conforme MAMEDE FILHO (2010), e então feito aproximação de acordo com a equação (A.1).

Figura A.1 – Sequencia dos circuitos do transformador à carga.



Fonte: Autor.

$$P_{ccpu} = \frac{P_{nom} * P_{ccpuExemplo}}{P_{nomExemplo}} = \frac{0,300 * 119,511}{1} = 35,853 \quad (A.1)$$

Onde:

P_{ccpu} : potência de curto circuito em [pu] suposta do ponto de entrega;

P_{nom} : potência nominal do transformador [pu];

$P_{ccpuExemplo}$: potência de curto circuito em [pu] do exemplo;

$P_{nomExemplo}$: potência nominal do transformador [pu];

A.2 – IMPEDÂNCIA REDUZIDA

Então, após ser encontrado o valor da potência de curto circuito para a instalação, segundo FILHO (2010), a parte da resistência reduzida é desprezada por ser inferior ao valor da reatância do sistema de suprimento. Então, a reatância em [pu] pode ser calculada segundo a equação (A.2).

$$X_{uredz} = \frac{P_{cu}}{P_{ccpu}} = 8,367 * 10^{-3} j \quad (A.2)$$

Onde:

X_{uredz} : reatância de impedância reduzida em [pu].

P_b : potência base, 300 kVA;

No qual, a impedância reduzida pode ser representada como:

$$\bar{Z}_{uredz} = R_{uredz} + X_{uredz} = 8,367 * 10^{-3} j \quad (A.3)$$

Onde:

\bar{Z}_{uredz} : impedância reduzida em [pu];

R_{uredz} : resistência reduzida, como já citado anteriormente, é aproximadamente zero;

A.3 – IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR

Por conseguinte, têm-se a equação (A.4) para a impedância do transformador.

$$R_{\%trafo} = \frac{P_{cobre}}{P_{nom}} = 12,333 * 10^{-3} \Omega \quad (A.4)$$

Onde:

$R_{\%trafo}$: resistência percentual do transformador;

P_{cobre} : perdas no cobre para transformador de 300 kVA, disponível na Tabela 3.3;

$$R_{putrafo} = \left(\frac{P_{base}}{P_{nom}} \right) * \left(\frac{V_{nom}}{V_{base}} \right)^2 = 12,333 * 10^{-3} \Omega \quad (A.5)$$

Onde:

$R_{putrafo}$: resistência do transformador em [pu];

P_{base} : potência de base, escolhida própria potência do transformador (300 kVA);

V_{nom} : tensão elétrica nominal de linha do secundário, 380 V;

V_{base} : tensão elétrica de base, escolhida própria tensão elétrica do secundário (380 V);

$$X_{\%trafo} = \sqrt{Z_{\%trafo}^2 - R_{\%trafo}^2} = 43,277 * 10^{-3}j \quad (A.6)$$

Onde:

$X_{\%trafo}$: reatância percentual do transformador;

$Z_{\%trafo}$: impedância percentual do transformador, disponível na Tabela 3.3 (4,5%);

$$X_{putrafo} = \left(\frac{P_{base}}{P_{nom}}\right) * \left(\frac{V_{nom}}{V_{base}}\right)^2 = 43,277j * 10^{-3} \quad (A.7)$$

Onde:

$X_{putrafo}$: reatância do transformador em [*pu*];

P_{base} : potência de base, escolhida própria potência do transformador (300 *kVA*);

V_{nom} : tensão elétrica nominal de linha do secundário, 380 *V*;

V_{base} : tensão elétrica de base, escolhida própria tensão elétrica do secundário (380 *V*);

$$\bar{Z}_{putrafo} = R_{putrafo} + X_{putrafo} = (12,333 + 43,277j) * 10^{-3} \quad (A.8)$$

Onde:

$\bar{Z}_{putrafo}$: impedância do transformador em [*pu*];

A.4 – IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR ATÉ O QGBT

Os condutores de fase utilizados nessa secção foram de 300 *mm*², e tiveram comprimento de 25 *metros* aproximadamente.

$$R_{c1} = R_1 * \frac{L_{c1}}{N_{c1}} = 1,952 * 10^{-3} \quad (A.9)$$

Onde:

R_{c1} : resistência do condutor em [Ω] que conecta o transformador até o QGBT;

R_1 : resistência média do condutor utilizado na instalação em $[\Omega]$, disponível na Tabela 3.1 (0,0781 $m\Omega$);

L_{c1} : comprimento do condutor em [m] que conecta o transformador até o QGBT (25 m);

N_{c1} : número de condutores em paralelo que conecta o transformador até o QGBT (1 condutor);

$$R_{puc1} = \frac{R_{c1}}{Z_{base}} = 4,056 * 10^{-3} \quad (\text{A.10})$$

Sabendo que:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{P_{base}} = 481,333 * 10^{-3} \quad (\text{A.11})$$

Onde:

R_{puc1} : resistência do condutor em [pu], que conecta o transformador até o QGBT;

Z_{base} : impedância de base;

$$X_{c1} = X_1 * \frac{L_{c1}}{N_{c1}} = 2,67j * 10^{-3} \quad (\text{A.12})$$

Onde:

X_{c1} : reatância do condutor em $[\Omega]$ que conecta o transformador até o QGBT;

X_1 : reatância média do condutor utilizado na instalação em $[\Omega]$, disponível na Tabela 3.1 (0,1068 $m\Omega$);

$$X_{puc1} = \frac{R_{c1}}{Z_{base}} = 5,547j * 10^{-3} \quad (\text{A.13})$$

Onde:

X_{puc1} : resistência do condutor em [pu], que conecta o transformador até o QGBT;

A impedância desse primeiro trecho que liga o transformador ao QGBT em [pu] segue na equação (A.14):

$$\bar{Z}_{puc1} = R_{puc1} + X_{puc1} = (4,056 + 5,547j) * 10^{-3} \quad (\text{A.14})$$

Onde:

\bar{Z}_{puc1} : impedância do trecho entre o transformador e o QGBT em [pu];

A.5 – IMPEDÂNCIA DO BARRAMENTO DO QGBT

Valor utilizado para o dimensionamento para esse barramento foi escolhido 50mm x 10mm, barra sem pintura de 1,25 metros de comprimento, aproximadamente.

$$R_{b1} = R_{barras1} * \frac{L_{b1}}{N_{b1}} = 54,75 \mu\Omega \quad (A.15)$$

Onde:

R_{b1} : resistência do barramento em [Ω] do QGBT;

$R_{barras1}$: resistência média do barramento utilizado no QGBT em [Ω], disponível na Tabela 3.2 (0,0438 m Ω);

L_{b1} : comprimento do barramento em [m] do QGBT(1,25 m);

N_{b1} : número de barras em paralelo por fase no QGBT(1 barra);

$$R_{pub1} = \frac{R_{b1}}{Z_{base}} = 113,747 * 10^{-6} \quad (A.16)$$

Onde:

R_{pub1} : resistência da barra em [pu], utilizado no QGBT;

$$X_{b1} = X_{barras1} * \frac{L_{b1}}{N_{b1}} = 213,375j * 10^{-6} \quad (A.17)$$

Onde:

X_{b1} : reatância do barramento em [Ω] do QGBT;

$X_{barras1}$: reatância média do barramento utilizado no QGBT em [Ω], disponível na Tabela 3.2 (0,1707 m Ω);

$$X_{pub1} = \frac{X_{b1}}{Z_{base}} = 443,3j * 10^{-6} \quad (A.18)$$

Onde:

X_{pub1} : reatância da barra em [pu], utilizado no QGBT;

A impedância desse primeiro barramento, do QGBT em [pu] segue na equação (A.19):

$$\bar{Z}_{pub1} = R_{pub1} + X_{pub1} = (213,375 + 443,3j) * 10^{-6} \quad (A.19)$$

Onde:

\bar{Z}_{pub1} : impedância do primeiro barramento, do QGBT em [pu];

A.6 – IMPEDÂNCIA DO QGBT ATÉ QLF LF

Os condutores de fase utilizados nessa seção foram de 10 mm^2 , e tiveram comprimento de 15 metros aproximadamente.

$$R_{c2} = R_2 * \frac{L_{c2}}{N_{c2}} = 33,332 * 10^{-3} \quad (A.20)$$

Onde:

R_{c2} : resistência do condutor em [Ω] que conecta o QGBT até o QLF LE;

R_2 : resistência média do condutor utilizado na instalação em [Ω], disponível na Tabela 3.1 (2,222 m Ω);

L_{c2} : comprimento do condutor em [m] que conecta o QGBT até o QLF LE (15 m);

N_{c2} : número de condutores em paralelo que conecta o QGBT até o QLF LE (1 condutor);

$$R_{puc2} = \frac{R_{c2}}{Z_{base}} = 69,248 * 10^{-3} \quad (A.21)$$

Onde:

R_{puc2} : resistência do condutor em [pu], que conecta o QGBT até o QLF LE;

$$X_{c2} = X_2 * \frac{L_{c2}}{N_{c2}} = 1,811j * 10^{-3} \quad (A.22)$$

Onde:

X_{c2} : reatância do condutor em [Ω] que conecta o QGBT até o QLF LE;

X_2 : reatância média do condutor utilizado na instalação em [Ω], disponível na Tabela 3.1 (0,1207 m Ω);

$$X_{puc2} = \frac{R_{c2}}{Z_{base}} = 3,761j * 10^{-3} \quad (A.23)$$

Onde:

X_{puc2} : resistência do condutor em [pu], que conecta o QGBT até o QLF LE;

A impedância desse segundo que conecta o QGBT até o QLF LE em [pu] segue na equação (A.24):

$$\bar{Z}_{puc2} = R_{puc2} + X_{puc2} = (69,248 + 3,761j) * 10^{-3} \quad (A.24)$$

Onde:

\bar{Z}_{puc2} : impedância do trecho entre o QGBT até o QLF LE em [pu];

A.7 – IMPEDÂNCIA BARRAMENTO DO QLF LF

Valor utilizado para o dimensionamento para esse barramento foi escolhido 12mm x 2mm, barra sem pintura.

$$R_{b2} = R_{barras2} * \frac{L_{b2}}{N_{b2}} = 1,162 * 10^{-3} \quad (A.25)$$

Onde:

R_{b2} : resistência do barramento em [Ω] do QLF;

$R_{barras2}$: resistência média do barramento utilizado no QLF em $[\Omega]$, disponível na Tabela 3.2 (0,9297 m Ω);

L_{b2} : comprimento do barramento em [m] do QLF (1,25 m);

N_{b2} : número de barras em paralelo por fase no QLF (1 barra);

$$R_{pub2} = \frac{R_{b2}}{Z_{base}} = 1,932 * 10^{-3} \quad (\text{A.26})$$

Onde:

R_{pub2} : resistência da barra em [pu], utilizado no QLF;

$$X_{b2} = X_{barras2} * \frac{L_{b2}}{N_{b2}} = 0,357j * 10^{-3} \quad (\text{A.27})$$

Onde:

X_{b2} : reatância do barramento em $[\Omega]$ do QLF;

$X_{barras2}$: reatância média do barramento utilizado no QLF em $[\Omega]$, disponível na Tabela 3.2;

$$X_{pub2} = \frac{X_{b2}}{Z_{base}} = 0,593j * 10^{-3} \quad (\text{A.28})$$

Onde:

X_{pub2} : reatância da barra em [pu], utilizado no QLF;

A impedância desse segundo barramento, do QLF em [pu] segue na equação (A.29):

$$\bar{Z}_{pub2} = R_{pub2} + X_{pub2} = (1,932 + 0,593j) * 10^{-3} \quad (\text{A.29})$$

Onde:

\bar{Z}_{pub2} : impedância do segundo barramento, do QLF em [pu];

A.8 – IMPEDÂNCIA DO QLF LF ATÉ A CARGA

Os condutores de fase utilizados nessa secção foram de 4 mm^2 , e tiveram comprimento de 7 metros aproximadamente.

$$R_{c3} = R_3 * \frac{L_{c3}}{N_{c3}} = 38,863 * 10^{-3} \quad (\text{A.30})$$

Onde:

R_{c3} : resistência do condutor em $[\Omega]$ que conecta o QLF até a carga;

R_3 : resistência média do condutor utilizado na instalação em $[\Omega]$, disponível na Tabela 3.1 ($38,863 \text{ m}\Omega$);

L_{c3} : comprimento do condutor em $[\text{m}]$ que conecta o QLF até a carga (7 m);

N_{c3} : número de condutores em paralelo que conecta o QLF até a carga (1 condutor);

Consequentemente, para converter tal valor para $[pu]$, temos a equação (3.31) a seguir.

$$R_{puc3} = \frac{R_{c3}}{Z_{base}} = 80,739 * 10^{-3} \quad (\text{A.31})$$

Onde:

R_{puc3} : resistência do condutor em $[pu]$, que conecta o QLF até a carga;

$$X_{c3} = X_3 * \frac{L_{c3}}{N_{c3}} = 0,895j * 10^{-3} \quad (\text{A.32})$$

Onde:

X_{c3} : reatância do condutor em $[\Omega]$ que conecta o transformador até o QGBT;

X_3 : reatância média do condutor utilizado na instalação em $[\Omega]$, disponível na Tabela 3.1 ($0,1279 \text{ m}\Omega$);

$$X_{puc3} = \frac{X_{c3}}{Z_{base}} = 1,86j * 10^{-3} \quad (\text{A.33})$$

Onde:

X_{puc3} : reatância do condutor em $[pu]$, que conecta o QLF até a carga;

A impedância desse último trecho, que conecta o QLF até a carga em [pu] segue na equação (A.34):

$$\bar{Z}_{puc3} = R_{puc3} + X_{puc3} = (80,739 + 1,86j) * 10^{-3} \quad (A.34)$$

Onde:

\bar{Z}_{puc3} : impedância do trecho entre o QLF até a carga em [pu];

Após o levantamento, têm-se a seguir o valor da impedância total na equação (A.35).

$$\bar{Z}_{total} = \bar{Z}_{uredz} + \bar{Z}_{putrafo} + \bar{Z}_{puc1} + \bar{Z}_{pub1} + \bar{Z}_{puc2} + \bar{Z}_{pub2} + \bar{Z}_{puc2} \quad (A.35)$$

$$\bar{Z}_{total} = 0,168 + 0,064j$$

Com intuito de transformar tais valores em valores de resistência e indutância, serão necessárias as duas próximas equações (A.36) e (A.37).

$$R_{linha} = Re(\bar{Z}_{total}) = 168,423 \text{ m}\Omega \quad (A.36)$$

$$L_{linha} = \frac{Im(\bar{Z}_{total})}{2*\pi*f} = 168,368 \text{ mH} \quad (A.37)$$

Onde:

R_{linha} : resistência equivalente do sistema em [Ω];

L_{linha} : indutância equivalente do sistema em [H];

f : frequência do sistema elétrico;