

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

**PROJETO E ANÁLISE DE FILTROS HARMÔNICOS
EM SUBESTAÇÕES DA UFRN**

ÊNIO VALE DE OLIVEIRA CUNHA

ORIENTADORA: PROF. DRA. CRISLUCI KARINA SOUZA SANTOS CÂNDIDO

COORIENTADOR: PROF. DR. MAX CHIANCA PIMENTEL FILHO

Natal - RN
Dezembro/2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

**PROJETO E ANÁLISE DE FILTROS HARMÔNICOS
EM SUBESTAÇÕES DA UFRN**

ÊNIO VALE DE OLIVEIRA CUNHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Energia Elétrica, área de concentração: Qualidade de Energia

Orientadora: Dra. Crisluci Karina Souza Santos Cândido

Coorientador: Dr. Max Chianca Pimentel Filho

Natal - RN
Dezembro/2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Cunha, Ênio Vale de Oliveira.

Projeto e análise de filtros harmônicos em subestações da UFRN
/ Ênio Vale de Oliveira Cunha. - 2020.
123 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande
do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em
Energia Elétrica, Natal, RN, 2020.

Orientadora: Profa. Dra. Crisluci Karina Souza Santos
Cândido.

Coorientador: Prof. Dr. Max Chianca Pimentel Filho.

1. Cargas não lineares - Dissertação. 2. Qualidade de energia
- Dissertação. 3. Filtros - Dissertação. 4. Índice de distorção
harmônica - Dissertação. 5. Software PSIM® - Dissertação. I.
Cândido, Crisluci Karina Souza Santos. II. Filho, Max Chianca
Pimentel. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 681.5

Elaborado por Ana Cristina Cavalcanti Tinoco - CRB-15/262

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

PROJETO E ANÁLISE DE FILTROS HARMÔNICOS EM SUBESTAÇÕES DA UFRN

ÊNIO VALE DE OLIVEIRA CUNHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Energia Elétrica, área de concentração: Qualidade de Energia.

Aprovado em 10 de dezembro de 2019.

Membros da Banca:

Prof^a. Dr^a. Crisluci Karina Souza Santos Cândido
(Orientadora –UFRN)

Prof. Dr. Max Chianca Pimentel Filho
(Interno à Instituição – UFRN)

Prof. Dr. Jacques Cousteau da Silva Borges
(Externo à Instituição – IFRN)

Natal - RN
Dezembro/2019

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Jorge Luiz de Oliveira Cunha e Maria Isabel Vale Cunha, por todo o amor, carinho e incentivo que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal. À minha namorada Romeica da Silva Simplício, por sempre me apoiar e acreditar no meu potencial.

Aos meus orientadores, Crisluci Karina Souza Santos Cândido e Max Chianca Pimentel Filho por terem contribuído com seu conhecimento e atenção para a realização deste trabalho.

RESUMO

A qualidade da energia é um tópico bastante importante para o sistema elétrico como um todo, com base nisso, sua degradação está diretamente ligada ao aumento das cargas não lineares, cuja carga não linear é a principal causadora da distorção harmônica e amplamente utilizada em todo o sistema elétrico. Para a solução deste problema utiliza-se os filtros ativos, híbridos e passivos com o auxílio de simuladores afim da melhora da qualidade de energia em certos pontos estudados. Com base nisso utilizou-se duas subestações da UFRN para serem feitas medições com analisadores de energia, a fim de se coletarem os índices de distorção harmônica e com esses dados projetar os filtros ativo, híbrido, com a utilização dos métodos p-q e SRF, e passivo além de fazerem as simulações com o software PSIM®. Visando, desta forma, comprovar a eficiência dos filtros estudados e a melhora da qualidade da energia nos locais abordados.

Palavras-chave: Cargas não lineares, Filtros, Índice de distorção harmônica, Qualidade de energia e Software PSIM®.

ABSTRACT

Power quality is a very important topic for the electrical system as a whole. Based on this, its degradation is directly linked to the increase in nonlinear loads, whose nonlinear load is the main cause of harmonic distortion and widely used throughout the world. electrical system. To solve this problem, the active, hybrid and passive filters are used with the help of simulators in order to improve the power quality in certain studied points. Based on this, two UFRN substations were used to make measurements with energy analyzers, in order to collect the harmonic distortion indices and with this data to design the active, hybrid filters, using the methods pq and SRF, and passive and simulate with PSIM® software. Aiming, in this way, to prove the efficiency of the studied filters and the improvement of the energy quality in the approached places.

Keywords: Filters, Harmonic Distortion Index, Nonlinear Loads, Power Quality, and PSIM® Software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da UFRN	22
Figura 2 - Perturbações mais comuns em redes elétricas.....	25
Figura 3 - Onda distorcida e suas harmônicas	28
Figura 4 - Filtro Passivo Paralelo	37
Figura 5 - Filtros passivos de sintonia (a) simples, (b) e (C) dupla.....	37
Figura 6 - Filtro ativo paralelo conectado à rede	39
Figura 7 – Filtro híbrido ativo paralelo-passivo paralelo	40
Figura 8 - Tetraedro de Potências.....	43
Figura 9 - Plano real imaginário	45
Figura 10 - Diagrama de Blocos da estratégia monofásica de compensação pelo método p-q	47
Figura 11 - Transformação referencial a-b-c para d-q.....	49
Figura 12 - Diagrama de blocos de um compensador SRF.....	49
Figura 13 - Compensador SRF com estratégia melhorada	50
Figura 14 – Compensador SRF melhorado adicionado da malha de controle de tensão do barramento CC.....	51
Figura 15 – Sistema p-PLL.....	52
Figura 16 - Gráfico de Potência Ativa versus Horas.....	55
Figura 17 – Percurso do alimentador 3 na Planta do Campus Central	57
Figura 18 – Diagrama Unifilar do alimentador 3	57
Figura 19 – Localização das subestações do CTEC E CCET	60
Figura 20 – Estrutura usada nos alimentadores da UFRN	62
Figura 21 - CW500	64
Figura 22 - Sondas de correntes com braçadeiras (a) e presas para coletar a tensão (b).....	64
Figura 23 - Ligação do Analisador em um sistema trifásico a quatro fios.....	65
Figura 24 - Medição ocorrida na Subestação do CTEC	67
Figura 25 – Filtro Ativo Paralelo topologia Split-Capacitor	68

Figura 26 – Diagrama de blocos da malha de controle de corrente do Filtro ativo de potência.....	69
Figura 27 – Diagrama de blocos da malha de controle de tensão do Filtro ativo de potência.....	70
Figura 28 –Corrente na carga na subestação do CTEC	73
Figura 29 – Tensão na carga na subestação do CTEC	74
Figura 30 - Corrente na carga na subestação do CCET	75
Figura 31 - Tensão na carga na subestação do CCET	76
Figura 32 – Corrente do Neutro na Subestação do CTEC	77
Figura 33 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET	78
Figura 34 – Sistema utilizado na Simulação.....	79
Figura 35 – Representação da Carga não Linear na Simulação.....	80
Figura 36 –Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro passivo	82
Figura 37 – Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro passivo	82
Figura 38 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro passivo	83
Figura 39 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro passivo	83
Figura 40 -Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros passivos	84
Figura 41 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros passivos	84
Figura 42 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro ativo SRF	86
Figura 43 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro ativo SRF	87
Figura 44 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Ativo SRF	87
Figura 45 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Ativo SRF	88
Figura 46 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros ativo SFR.....	88
Figura 47- Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros ativo SFR.....	89
Figura 48 - Tensão no capacitor do inversor de frequência e a referência desejada	91

Figura 49 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro ativo p-q	91
Figura 50 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro ativo p-q	92
Figura 51 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Ativo p-q	92
Figura 52 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Ativo p-q	93
Figura 53 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros ativo p-q.....	93
Figura 54 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros ativo p-q.....	94
Figura 55 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro híbrido SRF	96
Figura 56 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro híbrido SRF	97
Figura 57 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Híbrido SRF	97
Figura 58 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Híbrido SRF	98
Figura 59 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros híbrido SRF	98
Figura 60 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros híbrido SRF	99
Figura 61 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro híbrido p-q	101
Figura 62 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro híbrido p-q	101
Figura 63 – Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Híbrido p-q	102
Figura 64 – Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Híbrido p-q	102
Figura 65 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros híbrido p-q	103
Figura 66 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros híbrido p-q	103
Figura 67 – Plano s controlador PI	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de Distorção Harmônica em % da tensão na frequência fundamental	30
Tabela 2 – Máxima Distorção de Correntes em % de <i>IL</i> para tensões entre 120 e 69 kV	31
Tabela 3 - Estágio 1: Limites de emissão de harmônicos de corrente	33
Tabela 4 - Estágio 2: Limites de emissão de harmônicos de corrente para equipamento monofásico, bifásico e trifásico desequilibrado	33
Tabela 5 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais em porcentagem da tensão fundamental	34
Tabela 6 – Valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão em porcentagem da tensão fundamental	35
Tabela 7 - Comparação entre os filtros passivos e ativos/híbridos	40
Tabela 8 - Potência dos Transformadores no Alimentador 3	59
Tabela 9 – Informações técnicas dos transformadores 1 e 2 da subestação do CTEC	61
Tabela 10 - Informações técnicas do transformador da subestação do CCET	61
Tabela 11 – Resistência e Indutância da linha de transmissão até a Subestação do CTEC.....	62
Tabela 12 - Resistência e Indutância da linha de transmissão até a Subestação do CCET.....	62
Tabela 13 – Impedâncias do sistema	63
Tabela 14 - Especificações - CW500	66
Tabela 15 - Normas aplicadas - CW500.....	66
Tabela 16 – Harmônicos de corrente coletados na subestação da CTEC	73
Tabela 17 - Harmônicos de tensão coletados na subestação da CTEC	74
Tabela 18 - Harmônicos de corrente coletados na subestação da CCET	75
Tabela 19 - Harmônicos de tensão coletados na subestação da CCET	76
Tabela 20 – Comparação dos valores de tensão coletados do analisador de energia com as normas vigentes.....	78

Tabela 21 - Comparação dos valores de corrente coletados do analisador de energia com as normas vigentes.....	78
Tabela 22 – Valores dos Componentes e ganhos do sistema em estudo.....	81
Tabela 23 – Resultado da Implementação do filtro passivo	85
Tabela 24 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro passivo	85
Tabela 25 - Resultado da Implementação do filtro ativo SRF	89
Tabela 26 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro ativo SRF	90
Tabela 27 - Resultado da Implementação do filtro ativo p-q	94
Tabela 28 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro ativo p-q	95
Tabela 29 - Resultado da Implementação do filtro híbrido SRF	99
Tabela 30 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro híbrido SRF	100
Tabela 31 - Resultado da Implementação do filtro híbrido p-q	104
Tabela 32 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro híbrido p-q	104
Tabela 33 – Tabela de comparação entre os resultados coletados na simulação da subestação do CTEC	106
Tabela 34 - Tabela de comparação entre os resultados coletados na simulação da subestação do CCET	106
Tabela 35 – Parâmetros adotados para o cálculo dos ganhos.....	113
Tabela 36 – Ganhos adotados do Filtro Ativo na topologia Split- Capacitor.....	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – *Agência Nacional de Energia Elétrica*

CCET – *Centro de Ciências Exatas e da Terra*

COSERN – *Companhia Energética do Rio Grande do Norte*

CTEC – *Complexo Tecnológico de Engenharia*

DHPP – *Distorção Harmônica Ponderada*

FAP – *Filtro Ativo de Potência*

FP – *Fator de Potência*

FM – *Fator Multiplicador*

IEC – *Internacional Electrotechnical Commission*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

INFRA – *Superintendência de Infraestrutura*

IVA – *Volt-Ampere Imaginário*

PAC – *Ponto de acoplamento comum*

PLL – *Phase Locked Loop*

PD – *Plano Diretor*

PRODIST – *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*

SCR – *Silicon Controlled Rectifier*

SRF – *Synchronous Reference Frame*

THD – *Total Harmonic Distortion*

TDD – *Total Demand Distortion*

UFRN - *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*

Z3 – *Zona 3*

LISTA DE SÍMBOLOS

a,b,c - Sistema de coordenadas abc

a_h, b_h – Coeficientes da série de Fourier

C_{cc} - Capacitância do filtro ativo

C_h - Módulo da harmônica de ordem h

C_0 - Valor médio da harmônica de ordem h

dq0 – Sistema de referência síncrona

DHPP - Distorção harmônica ponderada

f – Frequência

h – Ordem harmônica

H – Potência Harmônica

I(t) – Corrente Instantânea

$I_{a,b,c}$ – Corrente nas coordenadas a,b,c

$I_{\alpha\beta 0}$ – Corrente no sistema de referência $\alpha\beta$

$i_{\alpha\beta}^{p,q}$ - parcela da corrente ativa e reativa instantânea no eixo $\alpha\beta$

I_h - Amplitude das componentes harmônicas individuais

I_L - Máxima corrente de demanda da carga no PCC

I_n - Corrente nominal do sistema

I_{SC} - Máxima corrente de curto circuito no PCC

$K_{p,i}$ – Ganhos do controlador PI

L_f – Indutância do filtro ativo

L_s – Indutância equivalente da subestação

$P_{\alpha\beta}^{p,q}$ - Potência ativa e reativa instantânea no eixo $\alpha\beta$

$P_{3\phi}$ - Potência Ativa trifásica

P_0 – Potência ativa de sequência zero

P – Potência Ativa

p(t) – Potência Ativa Instantânea

Q – Potência Reativa

$Q_{3\phi}$ - Potência Reativa trifásica
 R_{cce} - Potência aparente do equipamento
 R_f - Resistência do filtro ativo
 R_s - Resistência equivalente da subestação
 S - Potência Aparente
 S_{cc} - Potência de Curto-Circuito
 S_n - Potência nominal
 T - Período de uma senoide
 TDD - Distorção total demandada
 THD_i - Distorção Harmônica Total da corrente
 THD_v - Distorção Harmônica Total da tensão
 $V_{a,b,c}$ - Tensão nas coordenadas a,b,c
 $V_{\alpha\beta 0}$ - Tensão no sistema de referência $\alpha\beta$
 V_{cc} - Tensão contínua do inversor de frequência
 V_m - Tensão máxima
 V_n - Tensão nominal do sistema
 V_{pk} - Tensão de pico
 $V(t)$ - Tensão Instantânea
 W - Velocidade angular
 Z_{eq} - Impedância equivalente de Thevenin
 θ_h - Ângulo da componente harmônica h
 θ_1 - Ângulo de defasagem entre corrente e tensão da fundamental
 θ - Ângulo de defasagem entre corrente e tensão
 λ - Fator de distorção
 ε - Regulação do capacitor do filtro ativo
 $\alpha\beta 0$ - Sistema de referência $\alpha\beta$

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Contexto	19
1.2 Motivação e Objetivos	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 Metodologias empregadas no estudo.....	21
CAPÍTULO 2 - HARMÔNICOS NA REDE ELÉTRICA E ESTRATÉGIAS DE FILTRAGEM	24
2.1 Introdução	24
2.2 Harmônicos	26
2.2.1 Algumas fontes geradoras de harmônicos	26
2.2.2 Caracterização dos Harmônicos.....	27
2.2.3 Normas e resoluções.....	28
2.2.3.1 Norma IEEE – 519 – 2014.....	29
2.2.3.2 Norma IEC 61000-3-4 (1998).....	31
2.2.3.3 Normas da ANEEL	34
2.3 Filtros.....	35
2.3.1 Filtros Passivos	36
2.3.2 Filtro Ativos.....	38
2.3.3 Filtros Híbridos	39
CAPÍTULO 3 - MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE POTÊNCIA	41
3.1 Conceitos tradicionais de potência ativa e reativa.....	41
3.2 Estratégia de compensação baseada na teoria generalizada da potência reativa instantânea – (método p-q)	44
3.2.1 Estratégia monofásica de compensação baseada no método p-q.....	47
3.3 Compensação ativa baseada no sistema de eixos de referência síncrona – (método SRF).....	48
3.3.1 Controle de tensão no barramento cc pelo método SRF.....	50

3.3.2 Escolha da frequência de corte do filtro passa baixa (FPB)	51
3.3.3 Sistema PLL	51
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA	53
4.1 Considerações iniciais.....	53
4.2 Sistema da UFRN.....	53
4.2.1 Coleta de dados	54
4.2.2 Carregamento por alimentador.....	54
4.2.3 Alimentadores	56
4.2.3.1 Potência no alimentador 3.....	58
4.2.4 Subestações.....	59
4.2.4.1 Impedância de Thévenin dos pontos de medição	61
4.3 Analisador de Energia – CW500	63
4.4 Simulação.....	67
4.4.1 Filtro Ativo	67
4.4.1.1 Modelo do filtro ativo paralelo.....	68
4.4.1.2 Modelo do sistema de controle da tensão do barramento cc	69
4.4.1.3 Dimensionamento dos capacitores do barramento cc e dos indutores de acoplamento do inversor	70
4.4.2 Dimensionamento do filtro passivo RLC série shunt de 3ª e 5ª ordem	71
CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS	72
5.1 Considerações Iniciais.....	72
5.2 Sistema utilizado na simulação	79
5.3 Resultados do Filtro Passivo de 3ª e 5ª ordens.....	81
5.4 Resultados do filtro ativo	86
5.4.1 Filtro Ativo – Método de Compensação SRF	86
5.4.2 Filtro Ativo – Método de Compensação p-q	91
5.5 Resultados do Filtro Híbrido	96
5.5.1 Filtro Híbrido – Método de Compensação SRF	96
5.5.2 Filtro Híbrido – Método de Compensação p-q.....	100
5.6 Análise comparativa entre os Filtros apresentados	105
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	107

6.1 Estudos realizados e conclusões	107
6.1.1 Proposta de continuidade	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	109
APÊNDICE A- PROJETO DOS GANHOR KP E KI DOS CONTROLADORES PI.	113
APÊNDICE B- DIAGRAMAS UNIFILARES.....	115
APÊNDICE C- ARTIGO – CONGRESSO	118

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O aumento da utilização das cargas não lineares por todos os tipos de consumidores, tem submetido as concessionárias a uma preocupação cada vez maior em relação à qualidade da energia elétrica.

Hoje, quase todos os equipamentos utilizados pelos consumidores, principalmente, industriais são feitos com dispositivos eletrônicos, os quais não drenam somente energia ativa da rede elétrica. Eles solicitam da rede de distribuição energia reativa e acabam distorcendo o sinal de tensão e corrente o que acaba contribuindo para a degradação da qualidade da energia no sistema elétrico (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Cargas não lineares como: retificadores e conversores feitos com chaves semicondutoras, são responsáveis por gerar grande conteúdo harmônico na rede elétrica. Tais distorções na corrente geram deformações na forma de onda da tensão também e acabam prejudicando a qualidade da energia no PAC (Ponto de acoplamento comum) (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Para sanar esses problemas causados pelas correntes harmônicas, soluções envolvendo filtros de potência passivos, ativos ou híbridos são empregados. Os filtros passivos são normalmente utilizados por serem relativamente baratos quando comparados com os outros tipos, por apresentar baixa manutenção, porém não estão preparados para mudanças no sistema, podendo ficar obsoletos e não fazer uma boa filtragem (DAS, 2003).

Com o desenvolvimento da Eletrônica de potência tornou-se possível ocorrer a correção das distorções harmônicas de forma instantânea, por meio da construção de Filtros Ativos de Potência (FAP) capaz de se ajustarem automaticamente frente as

constantes mudanças da carga (Watanabe; Stepham, 1991). As referências de tensão e correntes são obtidas por meio de métodos baseados na teoria da potência ativa instantânea (Akagi, 1996). O método p-q (Método da Potência Reativa Instantânea) é baseado no cálculo das potências médias e oscilantes das potências instantâneas p e q. Existe também a estratégia baseada no sistema de eixos de referência síncrona (método SRF) (Divan; Bhattacharya; Banerjee, 1991). Este método tem como diferencial realizar a separação das componentes médias e oscilantes no eixo síncrono d-q.

A principal vantagem do FAP é se adaptar as mudanças ocorridas na rede elétrica e não apresentar problemas com relação a ressonância. As desvantagens dos FAP estão relacionadas ao custo de implantação e manutenção especializada que ele requer.

Uma outra opção para a mitigação harmônica são os filtros híbridos. Eles são a combinação de um filtro passivo mais um filtro ativo de baixa potência. Deste modo o custo total do filtro passa a ser relativamente menor se comparado com o filtro ativo convencional (AHRABIAN; SHAHNIA; HAQUE, 2006).

1.2 Motivação e Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Com o avanço do problema da qualidade de energia no sistema elétrico, causado principalmente pelas cargas não lineares que acabam ocasionando a distorção harmônica, resolveu-se fazer uma série de medições com um analisador de energia pela UFRN com o objetivo de coletar dados sobre os índices de distorção harmônica que afetam as instalações da universidade.

Com os dados das medições coletados serão feitos projetos de filtros ativos, passivos e híbridos, e aplicados os mesmos em uma simulação no software PSIM® a fim de se analisar a eficiência deles.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados de distorções harmônicas, a partir de analisadores de energia, na zona 03 da UFRN (Figura 1);
- Estudar as técnicas passivas de filtragem de harmônicos e simulá-las;
- Estudar e analisar através de simulações os métodos de compensação ativa de potência e do sistema de eixo de referência síncrona;
- Estudar o sistema PLL (Phase Locked Loop);
- Estabelecer modelo para os FAP a ser analisado;
- Apresentar um método de cálculo dos ganhos para os compensadores dinâmicos envolvidos nas malhas de tensão e corrente dos FAPs estudados;
- Analisar a topologia Split-Capacitor empregados em FAPs trifásicos a três fios através de simulação;
- Realizar um estudo comparativo entre os métodos de compensação;

1.3 Metodologias empregadas no estudo

As metodologias empregadas no estudo serão realizadas conforme descrito a seguir:

- **Estudo sobre qualidade da energia e filtros**

Realizar o estudo sobre a qualidade da energia elétrica e as principais cargas não lineares. Apresentar as normas e resoluções nacionais e internacionais que envolvam distorção harmônica, embasando os demais estudos na pesquisa. As técnicas de filtragem serão apresentadas. Todos esses pontos fazem parte do capítulo 2.

- **Descrição do sistema em estudo e da tipologia do filtro ativo apresentada**

Apresentar o sistema da UFRN, onde foram feitas as medições, com suas características. Mostrar como foram feitas as medições e os equipamentos utilizados

para tal ação e explicar a topologia do filtro ativo utilizado nas simulações, assim como os tipos de filtros passivos e seu dimensionamento. Esses pontos fazem parte do capítulo 4.

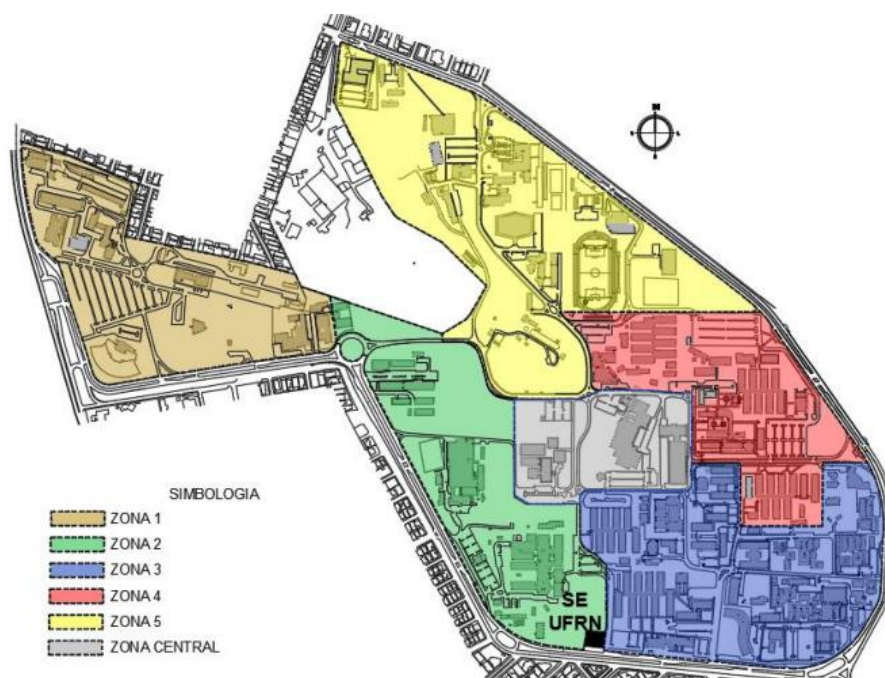


Figura 1 – Mapa da UFRN

Fonte: (PAIVA, 2019)

- **Estudo dos métodos de compensação ativa de potência**

O estudo dos conceitos tradicionais da potência ativa e reativa permite uma melhor compreensão da teoria generalizada da potência reativa instantânea (Método p-q). Além da compensação baseada no método p-q, será analisado o método de compensação baseado nos eixos de referência síncrono (SRF).

Serão apresentadas estratégias trifásicas de compensação aplicadas aos dois métodos citados acima. Esses assuntos vão compor o capítulo 3.

- **Simulações e resultados dos filtros e dos algoritmos de compensação**

No capítulo 5 serão realizadas simulações dos filtros passivos, ativos e híbridos baseados nos métodos p-q e SRF nas situações em que foram coletadas as distorções harmônicas pelos analisadores de energia.

- **Análise comparativa dos filtros ativo, passivo e híbrido, como também seus algoritmos de compensação**

Também no capítulo 5 será realizada uma análise comparativa dos resultados apresentados nas simulações entre os tipos de mitigação apresentados e os algoritmos de compensação de maneira a ressaltar as vantagens e desvantagens entre elas.

Capítulo 2

HARMÔNICOS NA REDE ELÉTRICA E ESTRATÉGIAS DE FILTRAGEM

1.4 Introdução

A qualidade da energia ganhou uma grande repercussão nos últimos anos na área tecnológica. Fato que é causado, principalmente, pelo o aumento do número de cargas que acabam degradando a energia do sistema. Somando-se a isso, os equipamentos eletrônicos, no modo geral, estão cada vez mais suscetíveis a falhas no sistema de alimentação, o que acarreta a diminuição da sua vida útil e a danos permanentes.

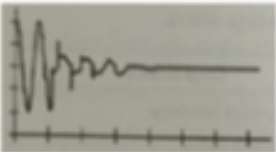

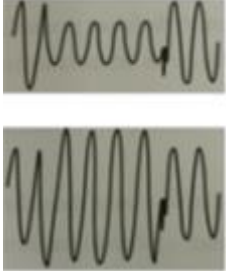
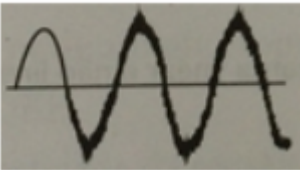
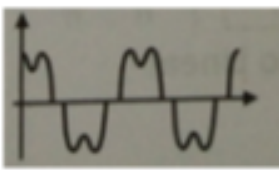
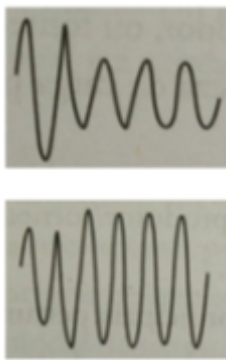
O termo qualidade da energia está ligado, principalmente, a quatro aspectos, são eles: nível e equilíbrio da tensão e corrente de um sistema, forma da onda, fator de potência e a frequência (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). A Figura 2 traz a ilustração dos principais fenômenos que podem afetar a qualidade da energia. Por tanto pode-se concluir que um problema na qualidade de energia está ligado ao mau funcionamento de um equipamento elétrico, causado pela má alimentação da energia.

Alguns problemas que afetam a qualidade da energia são descritos da seguinte forma segundo Paulilo (2010, p.33):

- **Interrupção de energia:** Total interrupção do fornecimento de energia, causados por acidentes, ações da natureza e outras razões, o que pode acabar causando avarias em equipamentos;
- **Transitório:** Alterações súbitas nas formas CA, resultando um abrupto, mas breve aumento de tensão, causados por tempestades (Raios), como também causas internas, pode causar erros de processamento e perdas de dados;

- **Afundamento/Elevação de tensão:** Qualquer decréscimo (afundamento) ou aumento (elevação) na tensão por um período entre meio ciclo a 3 segundos, causados por curto circuitos, e pode acarretar redução da vida útil e a diminuição da velocidade dos motores;
- **Ruído:** Sinal elétrico de alta frequência indesejável que altera a forma de onda da tensão convencional, causado pela interferência da transmissão de rádio ou televisão, e pode ocasionar a recepção distorcida de áudio e vídeo;
- **Distorção harmônica:** Alteração na forma senoidal da tensão devido a equipamentos gerando frequências diferentes de 60 Hz, onde essa alteração pode acarretar aquecimento de condutores e é causado por dispositivos eletrônicos e cargas não lineares;
- **Sub e Sobretensão:** Qualquer alteração abaixo ou acima do valor nominal da tensão que persista por mais de um minuto, causado pela flutuação de grandes cargas, cujo efeito pode ocasionar um sobreaquecimento dos motores.

Figura 2 - Perturbações mais comuns em redes elétricas

Interrupção de energia	Transitório	Afundamento/Elevação
		
Ruído	Distorção harmônica	Sub e Sobretensão
		

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)

1.5 Harmônicos

De todos os seis elementos citados como as principais distorções das formas de onda que afetam a qualidade da energia elétrica, os harmônicos são os mais importantes. Eles são causados pela presença das cargas não lineares no sistema, ou seja, são cargas em que a corrente requerida por esse equipamento não é proporcional a forma da tensão aplicada. Para uma análise mais precisa dessa distorção é utilizada uma ferramenta matemática chamada Série de Fourier, com ela é possível decompor as formas de onda periódicas distorcidas em ondas de frequência múltipla da fundamental (no sistema elétrico brasileiro é igual a 60 Hz) (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Segundo Leão (2014), a circulação de correntes harmônicas no sistema pode causar efeitos indesejados, tais como:

- Aumento da temperatura de operação e das perdas em capacitores, motores e transformadores;
- Diminuição do fator de potência;
- Aumento da corrente de neutro;
- Atuação indevida de equipamentos de proteção;
- Interferência ou falhas de operação em equipamentos sensíveis;
- Excitação de ressonâncias nas impedâncias do sistema;
- Distorção da tensão, em função da circulação de correntes harmônicas sobre as impedâncias do sistema.

1.5.1 Algumas fontes geradoras de harmônicos

As principais cargas não lineares, que são as fontes geradoras de harmônicos, são cargas compostas por retificadores dotados de filtros indutivos e/ou capacitivos. Dispositivos semicondutores são à base dos retificadores, os quais podem ser controlados (ex: SCR's) e não controlados como os diodos de potência (Barbi, 2006).

No caso de ambientes residenciais ou comerciais, as principais geradoras de harmônicos são os eletroeletrônicos como:

- Reatores eletrônicos das lâmpadas fluorescentes;

- Dimmers para lâmpadas incandescentes;
- Computadores, aparelhos de TV, fornos de micro-ondas, etc;
- Chuveiro com controle de temperatura eletrônico.

No caso das indústrias os principais contribuidores para a geração dos harmônicos são os inversores de frequência, Softstart, fornos a arco, pontes retificadoras, lâmpadas de descarga, entre outros.

1.5.2 Caracterização dos Harmônicos

A caracterização dos harmônicos se dá, normalmente, através da série de Fourier, ela foi concebida em 1822 pelo o matemático francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Através dessa ferramenta é possível transformar qualquer tipo de onda periódica, $g(t)$, de período T como em (2.1), uma soma de ondas senoidais de diferentes frequências, fases e amplitudes, conforme a equação (2.2) (B.P.LATHI, 2007). Com base nisso pode ser feita uma análise minuciosa de cada harmônico separadamente.

$$g(t) = g(t + hT), h = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \pm n. \quad (2.1)$$

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(hw_1 t) + b_h \sin(hw_1 t)] \quad (2.2)$$

$$w = 2\pi f_h = h2\pi f_1 \quad (2.3)$$

$$f = h f_1 \quad (2.4)$$

O valor h expresso em (2.3) é a ordem harmônica e f em (2.4) é a frequência. Com isso, pode-se encontrar o valor dos coeficientes a_h e b_h através de (2.5) e (2.6), respectivamente, sendo a_0 o valor médio da função periódica, o qual é, geralmente, zero quando se trata de harmônicos em sistemas de distribuição de energia (B.P.LATHI, 2007).

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \cos(hw_1 t) dt \quad (2.5)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sin(hw_1 t) dt \quad (2.6)$$

$$h = 1, 2, \dots \infty$$

Em relação aos coeficientes acima, eles podem ser simplificados e pode-se transformar (2.2) em (2.7) onde c_h é o módulo da harmônica de ordem h e c_0 o valor médio da função.

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(hw_1 t + \theta_h) \quad (2.7)$$

Em que:

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (2.8)$$

$$\theta_h = \arctan(a_h/b_h) \quad (2.9)$$

Desta forma, pode-se decompor uma onda qualquer periódica em várias senoides perfeitas de frequências diferentes, como mostra a figura 3:

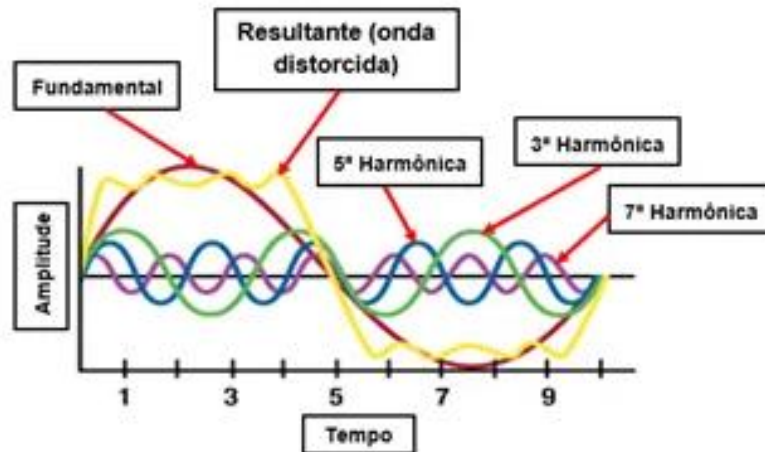


Figura 3 - Onda distorcida e suas harmônicas

Fonte: (BOLOTINHA, 2019)

1.5.3 Normas e resoluções

A distorção harmônica está presente desde os primórdios da implantação do sistema de distribuição de energia (ARRILLAGA; WATSON, 2003). Ela pode ocorrer tanto na forma de tensão e/ou corrente de um sistema elétrico.

A interação das componentes harmônicas de corrente, causadas pelas cargas não lineares que drenam correntes que contêm componentes múltiplas da frequência fundamental, com a impedância da rede podem causar quedas de tensão no PAC (DUGAN et al., 1996).

No

caso da distorção da tensão, ela afeta os equipamentos ligados ao PAC, ela pode ser observada por meio do aquecimento excessivo dos transformadores e cabos, aumento de ruídos nos motores e mau funcionamento de equipamentos sensíveis, por exemplo (A POMILIO, 2016) (SILVA, 2001).

A tolerância de um sistema em relação a distorção harmônica depende do tipo de carga ou da fonte de potência. Os equipamentos menos sensíveis são aqueles puramente resistivos, para os quais a forma de onda não interessa. Já os mais sensíveis são aqueles que para seu bom funcionamento necessitam de uma alimentação senoidal (A POMILIO, 2016).

No intuito de reduzir e controlar os impactos causados por esse tipo de distorção, entidades como IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), o IEC (International Electrotechnical Commission) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) procuram estabelecer recomendações técnicas e normas a fim de estabelecer limites na distorção harmônica.

1.5.3.1 Norma IEEE – 519 – 2014

A recomendação da norma IEEE 519 (2014) descreve os principais fenômenos que causam a distorções harmônicas, indica formas de se fazer as medições e os limites de distorção. Todos os limites que são estabelecidos por essa norma referem-se a valores medidos no PAC (IEEE, 2014). Desta forma, a principal ideia produzida por essa norma é que não interessa ao sistema de distribuição o que ocorre em uma determinada carga ou instalação, mas sim a influência desta nos demais consumidores conectados ao sistema.

Para uma melhor compreensão da norma o conceito de Distorção Harmônica Total THD (Total Harmonic Distortion) é muito importante, ela pode ser aplicada no cálculo da distorção de tensão ou de corrente. A Tabela 1 apresenta os limites de distorção harmônica individual e total para diferentes tensões no PAC. A distorção harmônica total de corrente é definida pela equação (2.10).

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.10)$$

Onde:

I_h = amplitude das componentes harmônicas individuais (valor eficaz);

h = ordem das harmônicas;

I_1 = Corrente da fundamental (valor eficaz).

Tabela 1 - Limites de Distorção Harmônica em % da tensão na frequência fundamental

Tensão no Barramento no PCC (V_n)	Distorção Harmônica Individual da Tensão (%)	Distorção Harmônica Total da Tensão - THD_V (%)
$V_n \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV < $V_n \leq 161$ kV	1,5	2,5
$V_n > 161$ kV	1,0	1,5

Fonte: (IEEE, 2014)

Os limites da distorção harmônica de corrente são diferentes com relação ao nível de tensão e do nível de curto-circuito do PAC. A Tabela 2 apresenta a máxima distorção harmônica de corrente em porcentagem. Segundo a norma referida quanto maior a corrente de curto-circuito em relação a corrente de carga, maiores são as distorções admitidas.

Outro conceito de extrema importância para a norma IEEE 519 (2014) é o conceito da Distorção Total da Corrente Demandada TDD (Total Demand Distortion), que é a distorção harmônica da corrente, em porcentagem da máxima demanda da corrente de carga, o que significa que a medição do TDD deve ser realizada no pico do consumo. A TDD pode ser calculada de acordo com a equação (2.11).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_n} \times 100\% \quad (2.11)$$

Onde:

I_h = amplitude das componentes harmônicas individuais (valor eficaz);

h = ordem das harmônicas;

I_n = Corrente nominal do sistema (valor eficaz).

Tabela 2 – Máxima Distorção de Correntes em % de I_L para tensões entre 120 e 69 kV

120V ≤ V_n ≤ 69kV						
Ordem Individual das Harmônicas (Harmônicas ímpares)						
I_{sc}/I_L	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<0	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
As harmônicas pares são limitadas em 25% dos limites das harmônicas ímpares acima						
Distorções de corrente que resultam em componente contínuo, por exemplo, conversores de meia onda, não são admissíveis.						
*Todo equipamento de corrente geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente.						
Onde:						
I_{sc} = Máxima corrente de curto circuito no PAC.						
I_L = Máxima corrente de demanda da carga no PAC.						

Fonte : (IEEE, 2014)

1.5.3.2 Norma IEC 61000-3-4 (1998)

A norma IEC 61000-3-4 (1998) refere-se a equipamentos eletroeletrônicos com uma corrente nominal de entrada maior que 16 A por fase, conectados a um sistema de baixa tensão ($V \leq 1\text{kV}$) dos seguintes tipos:

- Tensão nominal de até 240 V, monofásico, de dois ou três condutores;
- Tensão nominal de até 600 V, trifásico, de três ou quatro fios;
- Frequência nominal de 50 ou 60 Hz.

Os limites são definidos com base na potência de curto-circuito e na potência aparente do equipamento (R_{cce}). O valor de R_{cce} pode ser calculado com base nas equações (2.12) e (2.13).

$$S_{cc} = \frac{V_n^2}{|Z_{eq}|} \quad (2.12)$$

$$R_{cce} = \frac{S_{cc}}{S_n} \quad (2.13)$$

Onde:

S_{cc} = Potência aparente de curto-circuito;

Z_{eq} = Impedância de Thevenin do sistema;

S_n = Potência aparente nominal do equipamento.

Para essa norma o conceito de Distorção harmônica ponderada (DHPP) é de extrema relevância, ele leva em consideração os harmônicos de ordem elevada (de 14 a 40), onde ele considera um peso, igual a h , para cada ordem de componente harmônica. Em geral, quanto maior a ordem, menor sua magnitude, porém, maior sua chance de perturbar o meio e, por consequência, maior peso. O DHPP pode ser calculada usando a equação (2.14).

$$DHPP = \sqrt{\sum_{h=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2.14)$$

Na avaliação e definição dos limites de emissão de corrente, a norma IEC 61000-3-4 (1998) apresenta três categorias relacionadas aos procedimentos de conexão do equipamento.

- Estágio 1: Os aparelhos em conformidade com os limites do estágio 1 podem ser conectados a qualquer ponto do sistema de alimentação, desde que a relação de curto-circuito seja $R_{cce} \geq 33$.
- Estágio 2: Para os equipamentos que não estão em conformidade com os limites do estágio 1, são permitidos maiores valores de emissão, desde que a relação de curto-circuito seja $R_{cce} \geq 33$.
- Caso as condições do estágio 1 e 2 não sejam atendidas, aplica-se neste caso os requisitos da empresa operadora da rede de distribuição local.

As tabelas 3 e 4 mostram os limites de emissão de corrente para o estágio 1 e 2, respectivamente.

Tabela 3 - Estágio 1: Limites de emissão de harmônicos de corrente

Ordem	I_h/I_1 (%)	Ordem	I_h/I_1 (%)
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	≤ 0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	≤ 0,6
13	2,0	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	Pares	≤ $8/h$ ou ≤ 0,6

Fonte: IEC 61000-3-4 (1998)

Onde:

I_1 = Corrente nominal fundamental;

I_h = Corrente harmônica de ordem h.

Tabela 4 - Estágio 2: Limites de emissão de harmônicos de corrente para equipamento monofásico, bifásico e trifásico desequilibrado

Mínimo R_{cce}	Fatores admissíveis de distorção harmônica (%)		I_h/I_1 (%)					
	DHTi	DHPP	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Notas

- Os valores relativos das harmônicas pares não devem exceder $16/h\%$
- É permitida interpolação linear entre valores sucessivos de R_{cce}
- Em caso de equipamento trifásico desequilibrado, esses valores aplicam-se para cada fase.

I_1 Corrente nominal fundamental I_h Corrente harmônica de ordem h

Fonte: IEC 61000-3-4 (1998)

1.5.3.3 Normas da ANEEL

A ANEEL é o órgão responsável por toda a regulamentação do setor elétrico brasileiro, ela define um conjunto de regulamentos para o sistema de distribuição por meio de documentos denominados Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist), que são publicados livremente pela internet.

Os procedimentos sobre Qualidade da Energia Elétrica se encontram no Módulo 8 (2018) do Prodist, ele define toda a terminologia, características dos fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos às formas de onda da tensão em regime permanente e nas perturbações. Nas tabelas 5 e 6 são apresentados os valores de referência dos harmônicos de tensão.

Tabela 5 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais em porcentagem da tensão fundamental

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão DHT_V (%)
$V_n \leq 1KV$	10
$1KV < V_n \leq 13,8KV$	8
$13,8KV < V_n \leq 69KV$	6
$69KV < V_n < 230KV$	3

Fonte: Prodist, Módulo 8 (2018)

Tabela 6 – Valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão em porcentagem da tensão fundamental

Ordem	Distorção harmônica individual de tensão DHI_v (%)			
	$V_n \leq 1KV$	$1KV < V_n \leq 13,8KV$	$13,8KV < V_n \leq 69KV$	$69KV < V_n < 230KV$
Ímpares não múltiplos de 3				
5	7,5	6	4,5	2,5
7	6,5	5	4	2
11	4,5	3,5	3	1,5
13	4	3	2,5	1,5
17	2,5	2	1,5	1
19	2	1,5	1,5	1
23	2	1,5	1,5	1
25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplos de 3				
3	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5	0,5
>25	1	0,5	0,5	0,5
Pares				
2	2,5	2	1,5	1
4	1,5	1	1	0,5
6	1	0,5	0,5	0,0
8	1	0,5	0,5	0,5
10	1	0,5	0,5	0,5
12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Prodist, Módulo 8 (2018)

1.6 Filtros

Como já foi abordado, a distorção harmônica está sempre presente, em maior ou menor proporção, em todo o sistema elétrico. De uma forma geral, tanto os harmônicos de corrente como os de tensão devem ser mitigados somente quando ultrapassarem os limites normativos. Desta forma, existem várias soluções para a

mitigação harmônica, porém nem todas são adequadas para uma determinada situação (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). Cada rede elétrica é única e precisa de uma solução customizada.

As opções mais comuns para o controle dos harmônicos são (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

- Reduzir ou eliminar as correntes harmônicas de determinados equipamentos, como por exemplo: transformadores, conversores de potência, geradores e capacitores;
- Modificar a resposta em frequência do sistema;
- Adicionar filtros para drenar as correntes harmônicas, retirando-as do sistema de uma forma que bloqueia ou impede que elas entrem no sistema, ou suprimindo as correntes harmônicas localmente.

Dentre as opções apresentadas, a principal estratégia é a utilização de filtros. Eles podem ser classificados em filtros passivos, ativos e híbridos de acordo com a natureza de construção deles. Os passivos são filtros que utilizam apenas elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores. Já os filtros ativos utilizam-se de elementos advindos da eletrônica de potência, e o filtro híbrido é composto pela junção dos dois filtros citados (NOGUEIRA, 2018).

1.6.1 Filtros Passivos

Os filtros passivos são os mais utilizados para a mitigação dos harmônicos, pela sua simples construção, baixo custo e fácil dimensionamento. Este tipo de filtro é composto apenas de resistor, capacitor e indutor, ou seja, elementos passivos.

Eles podem ser classificados quanto ao seu modo de conexão à rede série ou paralelo. O filtro série atua como um circuito de bloqueio para uma frequência específica ou uma faixa de frequências, ele é formado por uma indutância e capacitância em paralelo, ação que se assemelha a uma bobina de bloqueio. Esta solução é cara e raramente utilizada, tendo como principal fator negativo o fato de transportar toda a corrente do sistema (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Já o filtro paralelo, ou shunt, é a solução mais usual para evitar que as correntes harmônicas penetrem em determinadas partes do sistema, ele oferece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de interesse, evitando que elas

penetrem em determinadas partes do sistema, como mostra a figura 4 (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Além de todas essas características, os filtros passivos paralelos podem ser divididos em dois tipos: sintonizados e amortecidos, os quais são subdivididos em sintonia simples ou dupla, mostrado na Figura 5, e filtros amortecidos de 1ª, 2ª e 3ª ordens e do tipo C.

Os filtros de sintonia simples são os mais utilizados comercialmente. Eles têm como característica ser um filtro passa-faixa ou passa-banda, cuja impedância é mínima na frequência de ressonância, realizando dessa forma uma filtragem eficiente em uma pequena faixa de frequência, onde normalmente são utilizados na filtragem de harmônicos de maiores amplitudes, ou seja, de baixa ordem. Por isso que eles são os mais seletivos para a eliminação de uma harmônica específica (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

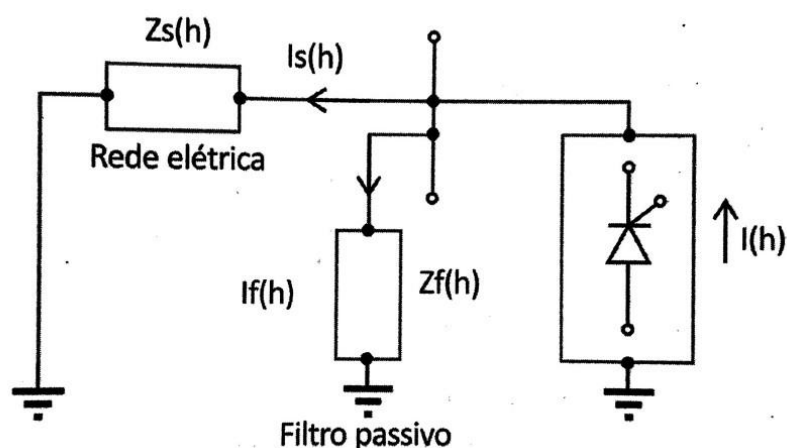


Figura 4 - Filtro Passivo Paralelo

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)

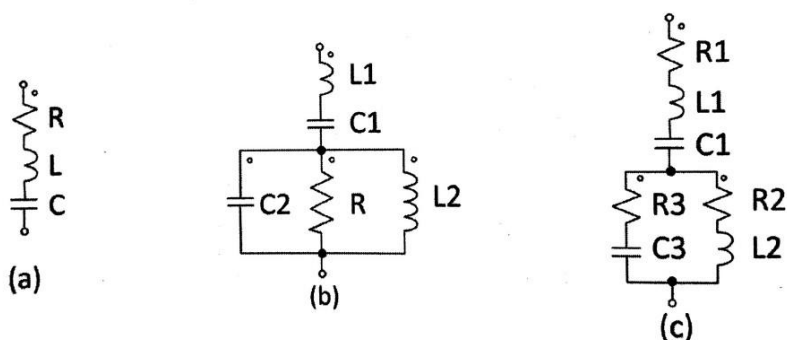


Figura 5 - Filtros passivos de sintonia (a) simples, (b) e (c) dupla.

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)

Já os filtros amortecidos são os que apresentam baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, ou seja, têm características de passa-alta, passa-baixa, passa-banda e rejeita-banda. A sua tipologia varia com a ordem do filtro, cuja ordem é resultante do maior expoente de w (velocidade angular) em sua função transferência, que está diretamente ligado ao número dos seus componentes, em geral é igual ao número de capacitores e indutores no circuito, portanto também está ligado diretamente ao seu tamanho físico e complexidade do projeto (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

1.6.2 Filtro Ativos

São equipamentos que podem compensar harmônicos de tensão e correntes, assim como os desequilíbrios na rede, aumento do fator de potência, além de ser autossintonizáveis e seletivos na filtragem (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Os filtros ativos se utilizam de chaves eletrônicas, para que através de técnicas de controle produzam correntes que sejam capazes de anularem a presença das harmônicas na rede de energia elétrica.

Eles são divididos em duas classes: série e paralelo. O filtro ativo série atua como uma fonte de tensão controlada, produzindo uma tensão de compensação o que acaba gerando uma tensão senoidal no ponto de conexão com a carga crítica. Já o filtro ativo paralelo (Figura 6) atua como uma fonte de corrente controlada conectada em paralelo com a carga, produzindo dessa forma uma corrente de compensação I_c , que é somada com a corrente da carga não linear I_L , o que acaba resultando em uma corrente senoidal na fonte (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

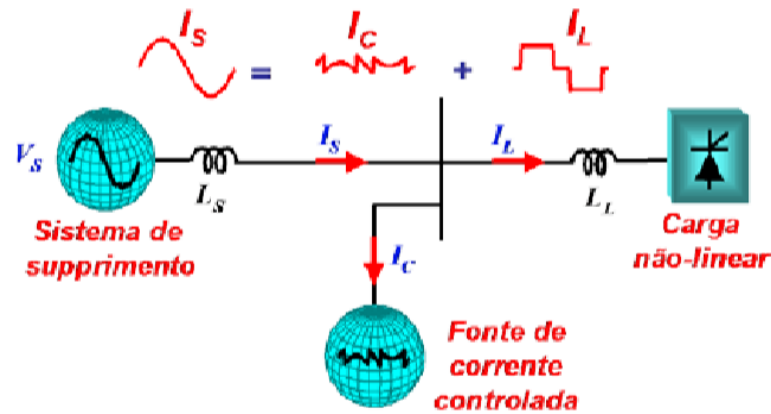


Figura 6 - Filtro ativo paralelo conectado à rede

Fonte: (ELETROBRAS, 2013)

O custo desse tipo de filtro, no geral, é mais barato que o custo do filtro ativo série. Isso se dá pelo o motivo do filtro ser percorrido apenas pelas correntes harmônicas, o que acaba exigindo menos do filtro (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

1.6.3 Filtros Híbridos

Os filtros híbridos se apresentam como uma alternativa ao uso de filtros ativos e passivos, os quais são formados por elementos passivos e conversores de potência. Essa tipologia de filtro é mais eficiente quando comparados com os outros dois citados anteriormente, pois apresentam uma melhor resposta na mitigação de harmônicos sem um custo adicional elevado, além disso a junção do filtro passivo com o ativo faz com que o filtro ativo trabalhe com sua capacidade reduzida, melhorando seu custo e acaba se tornando mais atrativo (NOGUEIRA, 2018).

Este equipamento é a junção do filtro ativo com o filtro passivo, cuja tipologia tem duas formas de configuração: ativo paralelo-passivo paralelo (Figura 7) e ativo série-passivo paralelo.

Com o intuito de estabelecer uma comparação foi feita a tabela 7 que resume um comparativo entre os filtros passivos e ativos/híbridos.

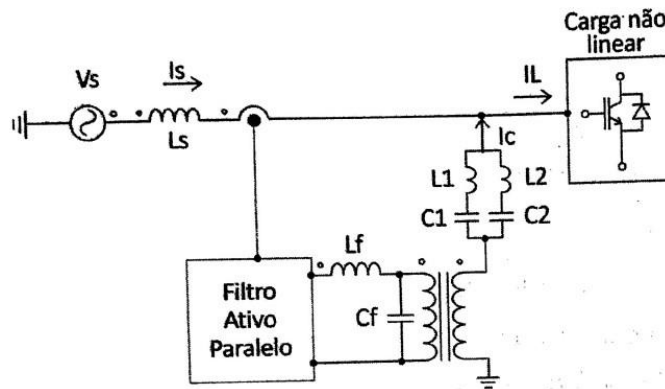


Figura 7 – Filtro híbrido ativo paralelo-passivo paralelo

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)

Tabela 7 - Comparação entre os filtros passivos e ativos/híbridos

	Filtros Passivos	Filtros ativos/híbridos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Boa confiabilidade; • Baixo custo de Implementação; • Baixo custo de Manutenção; • Redução de harmônicos e melhora o fator de potência; • Número reduzido de componentes; • Geram pouco ruído; • Não requerem fonte de alimentação; • Suportam grandes correntes e tensões 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamanho e peso reduzidos; • Não sofrem sobrecarga; • Mais fáceis de sintonizar; • Podem produzir altos ganhos; • São adaptáveis;
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Indutores grandes para baixas frequências; • Grande variação dos valores práticos dos capacitores; • Frequência de sintonia fixa; • Perda de sintonia; • Possibilidade de sobrecarga; 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo inicial; • Exigem fonte de alimentação; • Podem requerer muitos componentes suscetíveis a intermodulação e oscilações

Fonte: (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014)

Capítulo 3

MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO ATIVA DE POTÊNCIA

Este capítulo trata dos conceitos de potência ativa e reativa convencional. Apresenta estratégias de compensação baseadas na teoria da potência reativa instantânea (método p-q). Também trata da compensação baseada nos eixos de referência síncrona (Método SRF). Todos os dois utilizados nos filtros ativos em estudo.

1.7 Conceitos tradicionais de potência ativa e reativa

Os conceitos tradicionais de potência ativa e reativa foram estabelecidos em situações onde a alimentação era, perfeitamente, senoidal e a carga era linear (IRWIN, 2000). Quando ocorrem situações que estão presentes distorções harmônicas de tensão e/ou corrente, este tipo de abordagem se torna inadequada.

Com base nisso, serão apresentados de uma forma introdutória, conceitos teóricos convencionais de potência ativa e reativa, considerando uma carga linear e uma fonte de tensão puramente senoidal, em regime permanente (IRWIN, 2000). A potência ativa é definida pela equação (3.1):

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (3.1)$$

sendo:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos wt = V_m \cos wt \quad (3.2)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(wt \pm \theta) = I_m \cos(wt \pm \theta) \quad (3.3)$$

$$p(t) = V_m I_m \cos(wt) \cdot \cos(wt \pm \theta) \quad (3.4)$$

onde:

$p(t)$ – Potência ativa instantânea;

$v(t)$ – Tensão instantânea;

$i(t)$ – Corrente instantânea;

θ – Ângulo de defasagem entre corrente e tensão.

Usando a identidade trigonométrica pode-se obter a expressão (3.5):

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} \cos \theta + \left(\frac{V_m I_m}{2} \cos \theta \right) \cdot \cos(2\omega t) \pm \frac{V_m I_m}{2} \sin \theta \cdot \sin(2\omega t) \quad (3.5)$$

Sendo esta equação dividida em três parcelas, a primeira é formada por uma potência média independente do tempo, já a segunda representa a potência que oscila com o dobro da frequência da fundamental, ela nunca fica negativa e é considerada uma potência cc; e por último, a terceira parcela tem valor médio nulo e oscila com o dobro da frequência fundamental (Watanabe; Stephen, 1999).

Com base no conceito tradicional de potência apresentado é possível definir as potências aparente, potência ativa média e potência reativa pelas equações (3.6), (3.7) e (3.8), respectivamente.

$$S = \frac{V_m \cdot I_m}{2} = VI \quad (3.6)$$

$$P = VI \cos \theta \quad (3.7)$$

$$Q = VI \sin \theta \quad (3.8)$$

Com base nisso obtém-se:

$$p(t) = P + P \cos(2\omega t) \pm Q \sin(2\omega t) \quad (3.9)$$

Para um sistema trifásico equilibrado a potência instantânea é constante e igual ao valor médio, como mostra a equação (3.10) e a potência reativa trifásica definida pela equação (3.11).

$$p(t) = P_a(t) + P_b(t) + P_c(t) = 3P \quad (3.10)$$

$$Q_{3\phi} = 3Q \quad (3.11)$$

A equação da potência instantânea de um determinado circuito com uma carga não linear alimentado por uma fonte puramente senoidal em regime permanente pode ser obtida utilizando-se a equação (3.2) representando a tensão e a equação (3.12) a corrente (Watanabe; Stephen, 1999).

$$i_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{m_n} \cos(n \cdot \omega t \pm \theta) \quad (3.12)$$

Assim:

$$P_a(t) = VI \cos \theta_1 [1 + \cos(2wt)] \pm VI \sin \theta_1 \cdot \sin(2wt) \pm \sum_{n=2}^{\infty} 2VI_n \cos(wt) \cdot \cos(wt \pm \theta_n) \quad (3.13)$$

No caso da potência aparente, determinada pela equação (3.6) e considerando que a corrente eficaz é determinada pela equação (3.14), pode-se chegar as equações (3.15) e (3.16) elevando-se todos os termos ao quadrado.

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (3.14)$$

$$S^2 = V^2(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2) \quad (3.15)$$

Assim:

$$S^2 = (VI_1 \cos \theta_1)^2 + (VI_1 \sin \theta_1)^2 + V^2(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2) \quad (3.16)$$

A equação (3.16) apresenta, de forma clara, três partes em que são três tipos de potências diferentes, as quais são as potências ativa, reativa e harmônica, mostradas pelas equações (3.17), (3.18) e (3.19), respectivamente (Watanabe; Stephen, 1999).

$$P = VI \cos \theta_1 \quad (3.17)$$

$$Q = VI \sin \theta_1 \quad (3.18)$$

$$H = \sqrt{V^2(I_2^2 + I_3^2 + \dots)} = VI \sqrt{1 - \left(\frac{I_1}{I}\right)^2} \quad (3.19)$$

Reescrevendo a equação (3.15) em função de P, Q e H obtém-se:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \quad (3.20)$$

Com base na equação (3.20) percebe-se que a potência aparente passa a conter uma parcela harmônica H. A figura 8 mostra a representação gráfica do tetraedro de potências. Pode-se perceber que esse tetraedro de potências representa o triângulo de potências tradicional adicionando um eixo ortogonal aos eixos P e Q, o qual representa a potência harmônica H (Watanabe; Stephen, 1999).

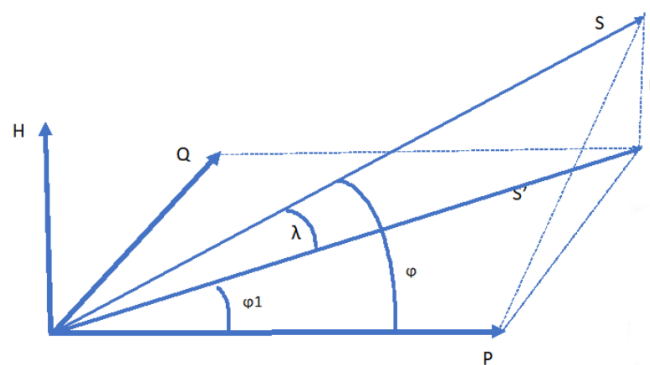


Figura 8 - Tetraedro de Potências

Fonte: (STAROSCA, 2019)

O fator de potência tradicional, o qual é determinado por cosseno de φ_1 , agora denominado de fator de potência de deslocamento ou fator de potência fundamental. Neste caso, com a inclusão da potência harmônica a definição de fator de potência muda de sentido (Watanabe; Stephen, 1999). Com isso o fator de potência fundamental, o fator de distorção e o fator de potência convencional passam a ser definidos pelas equações (3.21), (3.22) e (3.23).

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{S} \quad (3.21)$$

$$\frac{\sqrt{P^2+Q^2}}{S} = \frac{I_1}{I} = \cos \lambda \quad (3.22)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \lambda \quad (3.23)$$

1.8 Estratégia de compensação baseada na teoria generalizada da potência reativa instantânea – (método p-q)

A teoria da potência ativa e reativa instantânea (método p-q) foi proposta por Akagi em 1984. Os preceitos desta teoria são válidos para ondas de tensão e corrente, em regime permanente ou transitório. Essa teoria teve grande importância no desenvolvimento de estratégias para o controle de filtros ativos.

Ela utiliza uma transformação das coordenadas a-b-c de um sistema trifásico para o eixo denominado $\alpha - \beta - 0$, mais conhecida como Transformação de Clarke, onde X_a , X_b e X_c podem ser representados pelas tensões ou correntes do circuito. A Transformação de Clark e sua inversa estão representados pelas equações (3.24) e (3.25).

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_0 \\ X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

As potências real (p), imaginária (q) e de sequência zero (P_0) são dadas pela equação (3.26). Já a potência ativa instantânea trifásica pode ser calculada através da equação (3.27).

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$P_{3\phi} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta + V_0 i_0 = P + P_0 \quad (3.27)$$

Caso o sistema seja equilibrado, a soma das grandezas de tensão e corrente vai ser igual a zero, o que possibilita o sistema trifásico a-b-c ser representado por um sistema bifásico $\alpha - \beta$. Assim a potência instantânea pode ser calculada pela equação (3.28).

$$P_{3\phi} = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta = P \quad (3.28)$$

Já a potência instantânea imaginária é obtida com base no produto entre as tensões e correntes de eixos diferentes e perpendiculares, conforme a equação (3.29). Com base na figura 9 é feita a representação gráfica do plano real imaginário e percebe-se que a potência imaginaria definida por Akagi et al. é uma potência que reside no eixo imaginário perpendicular ao plano real das coordenadas $\alpha - \beta$.

$$q = V_\alpha i_\alpha - V_\beta i_\beta \quad (3.29)$$

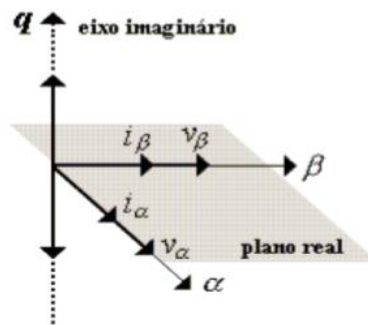


Figura 9 - Plano real imaginário

Fonte: (Feracin, 2009)

Outra característica da potência imaginária instantânea q é que ela representa a energia que pode ser constante ou não e é trocada entre as fases do sistema. Isto significa que “ q ” não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga em nenhum instante. Neste caso foi proposto por Akagi et al. (1984) uma nova unidade de medida para “ q ”, Volt-Ampere Imaginário (IVA).

Com base nas expressões (3.28) e (3.29), elas podem ser representadas de forma matricial conforme (3.30).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

De (3.30) Isolando as correntes i_α e i_β obtém-se:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Conforme a equação (3.31) é possível calcular as componentes ativas e imaginárias das correntes nas coordenadas $\alpha - \beta$, desta forma

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_\alpha^p \\ i_\beta^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_\alpha^q \\ i_\beta^q \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Onde,

$$i_\alpha^p = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} p \quad (3.33)$$

$$i_\alpha^q = \frac{-V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} q \quad (3.34)$$

$$i_\beta^p = \frac{V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} p \quad (3.35)$$

$$i_\beta^q = \frac{V_\alpha}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} q \quad (3.36)$$

Sabendo que $p_\alpha = v_\alpha i_\alpha$ e $p_\beta = v_\beta i_\beta$ é possível através da expressão (3.31) calcular as seguintes potências instantâneas:

$$p_\alpha^p = V_\alpha i_\alpha^p = \left(\frac{V_\alpha^2}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \right) p \quad (3.37)$$

$$p_\alpha^q = V_\alpha i_\alpha^q = \left(\frac{-V_\alpha V_\beta}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \right) q \quad (3.38)$$

$$p_{\beta}^p = V_{\beta} i_{\beta}^p = \left(\frac{V_{\beta}^2}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \right) p \quad (3.39)$$

$$p_{\beta}^q = V_{\beta} i_{\beta}^q = \left(\frac{V_{\alpha} V_{\beta}}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \right) q \quad (3.40)$$

Onde:

p_{α}^p é a potência ativa instantânea no eixo α ,

p_{α}^q é a potência reativa instantânea no eixo α ,

p_{β}^p é a potência ativa instantânea no eixo β ,

p_{β}^q é a potência reativa instantânea no eixo β .

1.8.1 Estratégia monofásica de compensação baseada no método p-q

A aplicação do método p-q em filtro ativo ou híbrido monofásico foi proposta por Liu et al (1999). A estratégia consiste na aplicação de atrasos na corrente e na tensão proporcional a criação, de forma fictícia, de um sistema trifásico a partir de um monofásico. Este artifício é implementado facilmente via algoritmo computacional.

O algoritmo mais eficiente é obtido com a inclusão de um atraso de 90° diretamente no sistema de coordenadas $\alpha - \beta$. Agora as componentes α e β são obtidas diretamente da rede, o que proporciona uma simplificação pois não há mais a necessidade de se fazer a transformação a-b-c/ $\alpha - \beta$. Outra característica é que este método tem que ser aplicado na tensão e corrente da fase de forma a proporcionar o cálculo das potências p e q. A figura 10 mostra o diagrama de blocos do método abordado.

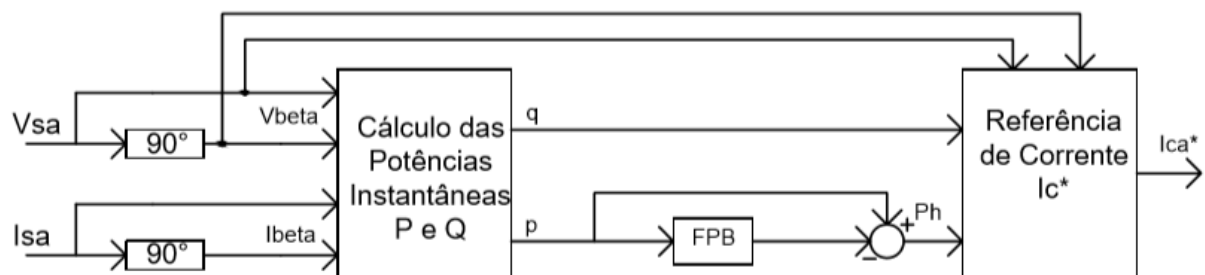


Figura 10 - Diagrama de Blocos da estratégia monofásica de compensação pelo método p-q

Fonte: Próprio Autor

As tensões V_α e V_β assim como as correntes I_α e I_β são calculadas pelas expressões (3.41) e (3.42).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cdot \sin \theta \\ V_m \cdot \sin(\theta - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \cdot \sin \theta \\ I_m \cdot \sin(\theta - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

A corrente de compensação de referência I_α^* , a qual vai gerar a corrente de referência de compensação I_{ca}^* através da equação (3.24), após isso devidamente modulada e injetada na rede por um filtro ativo paralelo será capaz de suprimir as componentes harmônicas e reativas da carga. Aplicando a equação (3.31) e considerando as potências p , p_h e q mostradas na figura 10, pode-se obter a equação (3.43).

$$I_\alpha^* = \frac{v_\alpha p_h - v_\beta q}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (3.43)$$

1.9 Compensação ativa baseada no sistema de eixos de referência síncrona – (método SRF)

No método baseado no sistema de eixos de referência síncrona (método SRF – Synchronous Reference Frame Method) as grandezas estacionárias das coordenadas a-b-c são transformadas para um referencial síncrono d-q-0 como é mostrado na figura 11. Esta estratégia é baseada em duas transformações invariantes no tempo. A primeira é a transformada de Clarke, a qual já foi mostrada nas equações (3.24) e (3.25), já a segunda é a transformada de Park, cuja equações são a (3.44) e (3.45).

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Para a aplicação da transformada de Park é necessário calcular as coordenadas do vetor unitário $\cos \theta$ e $\sin \theta$. O ângulo θ pode ser obtido a partir de um

PLL (Phase-Locked Loop). O resultado dessa estratégia é a obtenção de um sistema de referência síncrona composto por dois eixos, o primeiro é o eixo direto d e o segundo o eixo em quadratura q, além da componente homopolar (sequência zero) (Feracin, 2009).

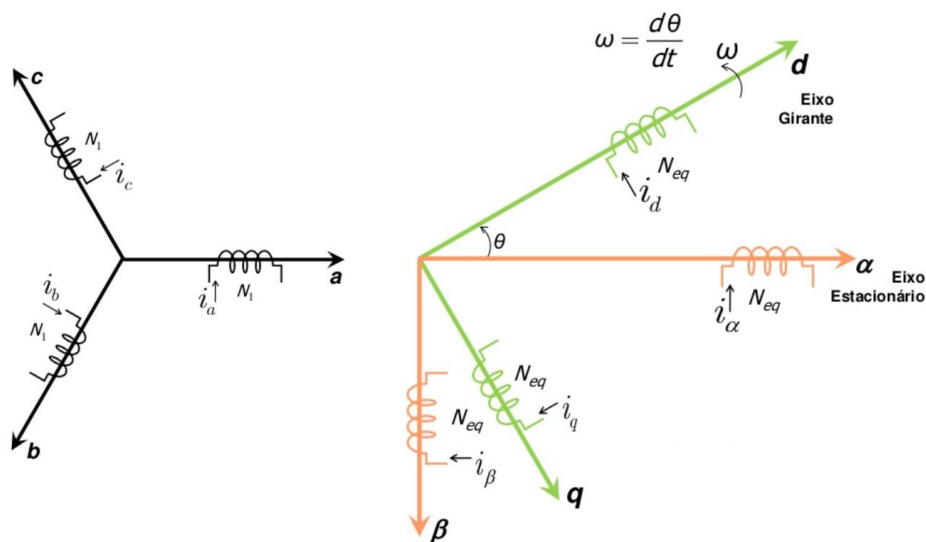


Figura 11 - Transformação referencial a-b-c para d-q

Fonte: (LIMA, 2015)

A figura 12 mostra um diagrama de blocos de um compensador SRF de corrente aplicado a um filtro ativo de potência onde as correntes de compensação são obtidas através das correntes das cargas. Este compensador faz a utilização de filtros passa-alta, o qual é largamente utilizada nas aplicações com filtros ativos de potência, como por exemplo, os métodos de compensação p-q e p-q-e já abordados no trabalho. Eles têm como objetivo separar as componentes harmônicas que serão compensadas (Akagi et al., 1990).

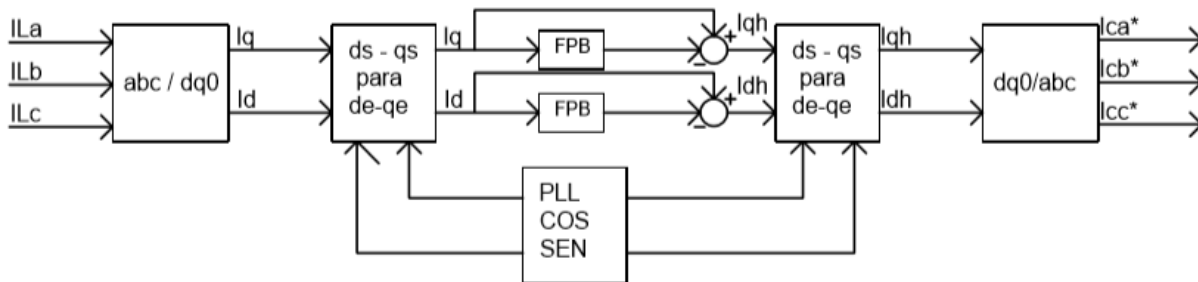


Figura 12 - Diagrama de blocos de um compensador SRF

Fonte: Próprio Autor

Com o objetivo de melhorar o rendimento deste tipo de compensador, fez-se uma nova implementação com o controle independente por fase (Figura 13). Ela tem como característica não permitir a compensação das componentes de sequência negativa e zero da frequência fundamental. Porém, a não compensação destas componentes de corrente diminui as perdas no filtro ativo, pois estas correntes não irão circular pelo conversor paralelo, o que melhora a sua eficiência (SILVA; MODESTO; BARBOSA, 2007).

Outro ponto positivo é a aplicação do filtro passa-alta em apenas um dos eixos d-q, neste caso apenas no eixo d, é que a parcela reativa fundamental seja compensada, assim como ocorre com as parcelas harmônicas (SILVA; MODESTO; BARBOSA, 2007). Assim como há um aperfeiçoamento na resposta dinâmica do filtro com a retirada da transformada de Clarke do compensador, pois a defasagem embutida passa a ser apenas de noventa graus, além de simplificar o algoritmo de controle (Liu et al ,1999).

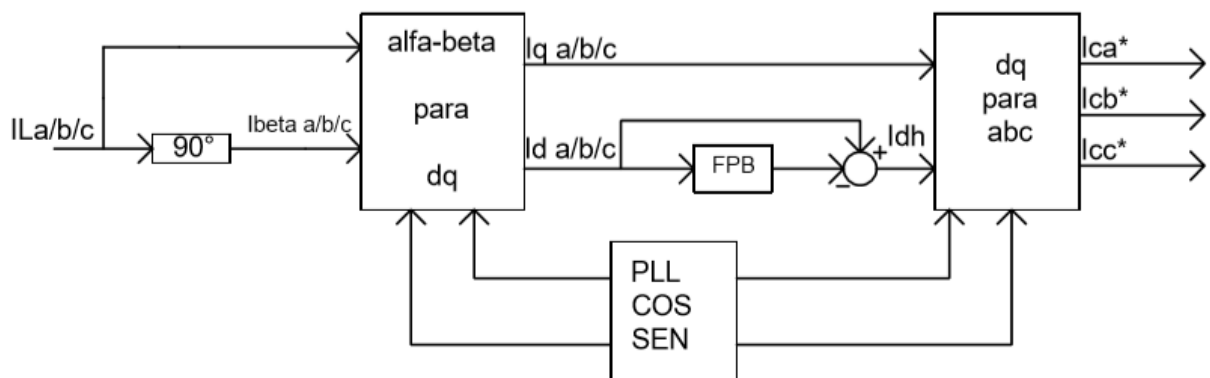


Figura 13 - Compensador SRF com estratégia melhorada

Fonte: Próprio Autor

1.9.1 Controle de tensão no barramento cc pelo método SRF

Devido às perdas inerentes ao inversor, a tensão no barramento CC tende a diminuir. Portanto existe a necessidade de ser incluída uma malha de controle de tensão no circuito de controle do filtro ativo. Ele tem como objetivo compensar as perdas e manter a tensão CC constante no valor desejável. Neste sistema uma parcela cc proveniente do controlador de tensão é adicionada a potência P_h fazendo com que o filtro ativo drene a potência ativa da rede, o que acaba compensando as

perdas. A figura 14 mostra o diagrama do compensador SRF com o controle de tensão, com base nesta imagem percebe-se que a saída do controlador de tensão é dividida por 3 antes de ser somada com I_{d_n} de cada fase. Desta forma a potência ativa drenada é dividida em parcelas iguais entre as fases (Feracin, 2009).

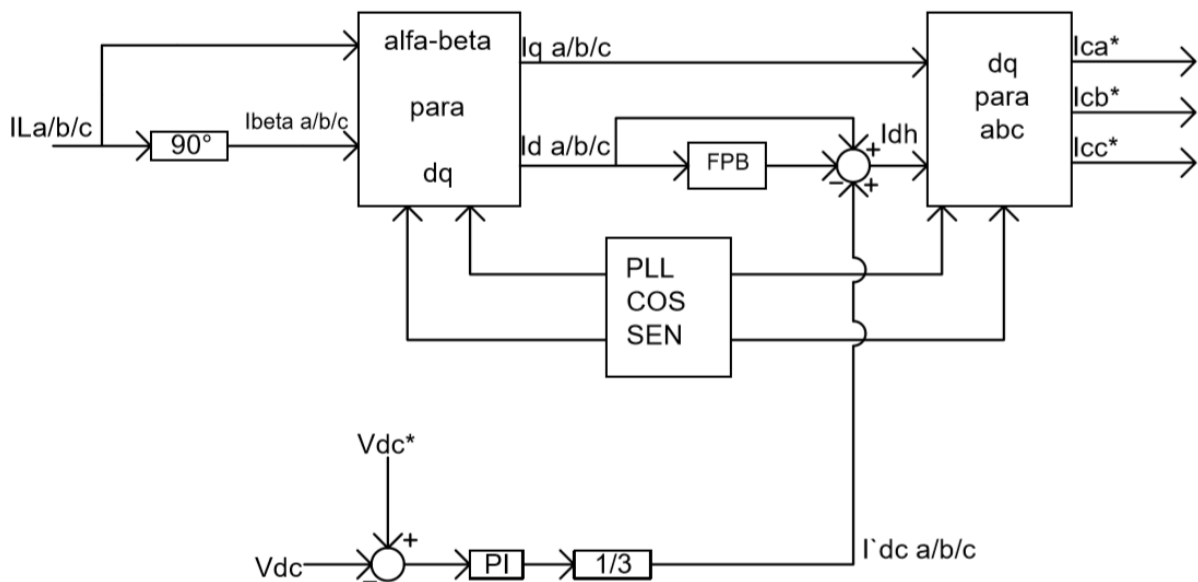


Figura 14 – Compensador SRF melhorado adicionado da malha de controle de tensão do barramento CC.

Fonte: Próprio Autor

1.9.2 Escolha da frequência de corte do filtro passa baixa (FPB)

No caso de sistemas desbalanceados há o aparecimento de componentes de sequência negativa nas correntes, que é o caso dos sistemas estudados. Essas componentes são responsáveis pelo aparecimento de componentes de 120 Hz no eixo síncrono d-q do compensador. Para garantir a filtragem destas componentes o filtro passa-baixa deverá possuir uma frequência de corte de 12 Hz, que representa uma década abaixo da menor frequência a ser filtrada (SILVA, 2001).

1.9.3 Sistema PLL

Os sistemas PLL são largamente utilizados em aplicações que envolvem filtros ativos de potência. Estes sistemas são capazes de trabalhar em malha fechada e

produzir um sinal de saída relacionado com a fase e frequência do sinal de entrada (Feracin, 2009).

O PLL é baseado na teoria p-q. Onde a potência instantânea que é utilizada no controle do sistema é a real, ou seja, p , por isso que ele também pode ser denominado p-PLL.

Pela figura 15 pode-se observar que a tensão V_β é obtida da tensão V_α mediante atraso de 90° e V_α é a própria tensão V_a , conforme a equação (3.46). Já frequência W_{ff} é usada para melhorar a dinâmica inicial do sistema p-PLL. Por fim, a equação (3.47) representa as correntes fictícias i_α' e i_β' e substituindo as equações (3.46) e (3.47) na equação (3.27), obtém-se a potência ativa fictícia p' conforme a equação (3.48) (Feracin, 2009).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha' \\ V_\beta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a(wt) \\ V_a(wt - \pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V \sin(wt) \\ \sqrt{2}V \sin(wt - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha' \\ I_\beta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a(\theta^*) \\ i_a(\theta^* - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$p' = V_{pk} \sin(wt) \sin(\theta^*) + V_{pk} \sin(wt - \pi/2) \sin(\theta^* - \pi/2) = V_{pk} \cos(wt - \theta^*) \quad (3.48)$$

Onde:

V_{pk} é a tensão de pico.

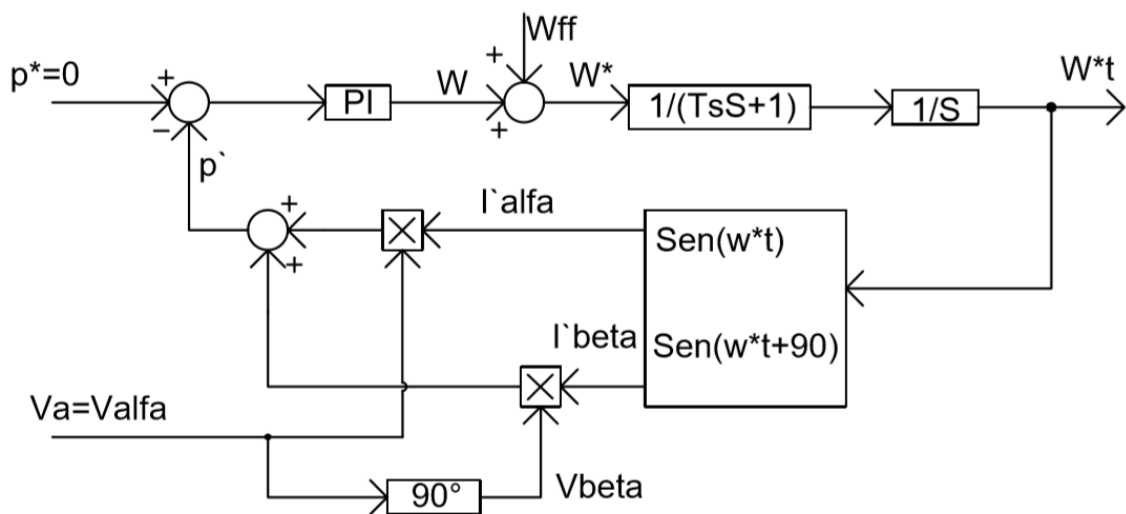


Figura 15 – Sistema p-PLL

Fonte: Próprio Autor

Capítulo 4

METODOLOGIA

1.10 Considerações iniciais

O presente trabalho visa coletar dados de distorção harmônica no Campus Central da UFRN. Trata-se de um sistema real e que se encontra em operação.

O principal objetivo deste trabalho é fazer medições na Universidade, mais precisamente na zona 3 do campus central, e com base nessas medições será feita uma simulação com o software PSIM®.

Com relação a isso, coletou-se dados do sistema da UFRN (zona 3), para que com base nesses dados possa-se chegar ao valor da impedância de Thevenin dos pontos onde foram feitas as medições, a fim de se obter o resultado mais realístico possível da simulação, que no caso deste trabalho foram a subestação do CTEC e do CCET, locais, nos quais foram possíveis fazer a medição da distorção harmônica e que tiveram os maiores índices de distorção.

1.11 Sistema da UFRN

O Campus central é regido pelo o Plano Diretor do Campus Universitário Central da UFRN.

Descrito na Resolução Nº 028/2017- CONSAD (UFRN, 2017), “ O Plano Diretor do Campus Universitário Central (PD Campus) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte é o instrumento básico da Política de Ocupação da Área, visando

seu adequado desenvolvimento urbano, sendo meio de orientação aos responsáveis pela gestão do espaço urbano”.

De acordo com a UFRN (2017), foi constatado que a única orientação seguida é a referente à infraestrutura elétrica, devendo ela ser baseada e organizada através de zonas, que são porções do terreno do Campus Universitário Central e limitadas, prioritariamente, pelo o sistema de infraestrutura viária. Por tanto o PD Campus considera as zonas como unidade territorial de planejamento.

Conforme a figura 1, as zonas são divididas em 6 unidades territoriais. Elas são nomeadas como Zona Central – ZC (na cor cinza), Zona 1 – Z1 (na cor dourada), Zona 2 – Z2 (na cor verde), Zona 3 – Z3 (na cor azul), Zona 4 – Z4 (na cor vermelha), Zona 5 – Z5 (na cor amarela) (PAIVA, 2019).

1.11.1 Coleta de dados

Para que os resultados das simulações sejam os melhores possíveis, é necessário conhecer o sistema atual do Campus Central – Z3, com informações de circuitos alimentadores, equipamentos de manobra e proteção e medidas elétricas. Portanto, é importante possuir projetos, registro dos equipamentos e medições de monitoramento do sistema (PAIVA, 2019).

No caso dos projetos e memoriais, estes foram coletados no setor de projetos da Superintendência de Infraestrutura (INFRA) da UFRN. O material consiste em projetos e memoriais do sistema elétrico de potência.

Com relação aos equipamentos foram realizadas visitas técnicas as subestações da Z3 com o objetivo de, primeiramente, fazer as medições das distorções harmônicas nas subestações e de coletar dados técnicos dos equipamentos ali expostos como disjuntores, transformadores e chaves.

1.11.2 Carregamento por alimentador

O sistema de distribuição de média tensão da UFRN é formado por seis alimentadores, a qual mostra o diagrama unifilar da subestação de 69 kV da Universidade, o qual está ilustrado no apêndice B, e para analisar seu comportamento, é necessário ter o registro das medições elétricas tais como corrente e potência

individual em cada alimentador. Neste caso a medição é registrada em tempo real em uma tela que é acessada diretamente do sistema supervisorio localizado na subestação de 69 kV.

Por isso que o único meio de se registrar essas medições é através da concessionaria local, COSERN, que fornece energia à UFRN. Para a obtenção dessas informações é necessário solicitar a COSERN o Relatório de Memória de Massa. Porém não é possível obter as medições por alimentador e sim, apenas da medição geral no barramento de 69 kV (PAIVA, 2019).

Com base no gráfico da figura 16, que é o resultado do Relatório da Memória de Massa fornecida pela COSERN (Companhia Energética do Rio Grande do Norte) no mês de abril de 2019, o qual fornece potência ativa a cada 15 minutos no período aproximado de 30 dias, pode-se observar que a demanda da UFRN tem dois momentos de pico: um no período da manhã e outro no período da tarde. Na manhã em um horário entre 10:15 e 11:30, e pela à tarde num período de 14:00 e 15:30. Com o horário da tarde tendo maior demanda, preferiu-se definir 14:30 como o momento para a retirada das informações contidas no analisador (PAIVA, 2019).

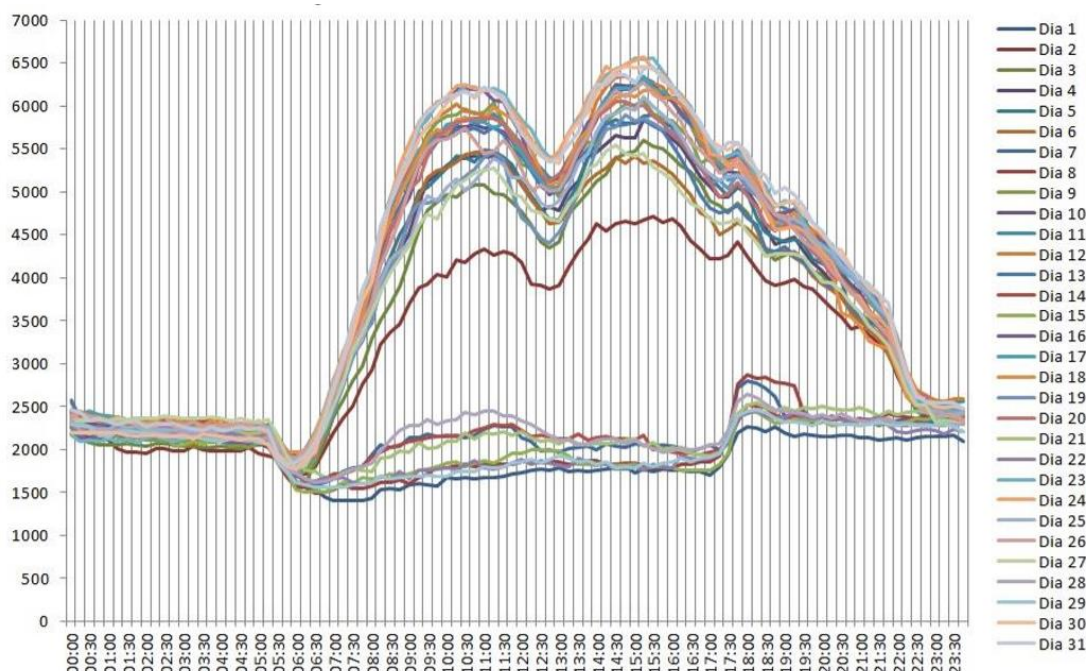


Figura 16 - Gráfico de Potência Ativa versus Horas

Fonte: (PAIVA, 2019)

1.11.3 Alimentadores

Os seis alimentadores que saem da subestação de 69 kV são distribuídos conforme a orientação do Plano Diretor do Campus. O objetivo de dividir por zonas é ter um sistema organizacional para a infraestrutura do Campus Central.

Os alimentadores são nomeados conforme a zona que deverão atender: Alimentador 1 atenderá a zona 1, Alimentador 2 atenderá a zona 2, Alimentador 3 atenderá a zona 3, Alimentador 4 atenderá a zona 4, Alimentador 5 atenderá a zona 5 e Alimentador 6 atenderá a zona central.

Esses alimentadores são compostos por cabos de cobre nu. Os alimentadores 2, 4, 5 e 6 são dotados de condutores com seção de 50 mm^2 , já os demais, alimentadores 1 e 3, são formados com cabos de seção 70 mm^2 no tronco do alimentador e nos ramais em cabos de 50 mm^2 (PAIVA, 2019).

Para o presente trabalho o alimentador 3 será um dos principais objetos de estudo por fornecer energia para Z3 do Campus Central. Ele tem como característica alimentar a zona com maior quantidade de prédios e de subestações no Campus Central, com um total de 19 subestações. Porém ele não conecta todas as subestações da zona 3, sendo duas subestações nesta área ligadas pelo o alimentador 4 (PAIVA, 2019).

Na figura 17 é mostrado o percurso do alimentador 3 e na figura 18 é apresentado o diagrama unifilar.

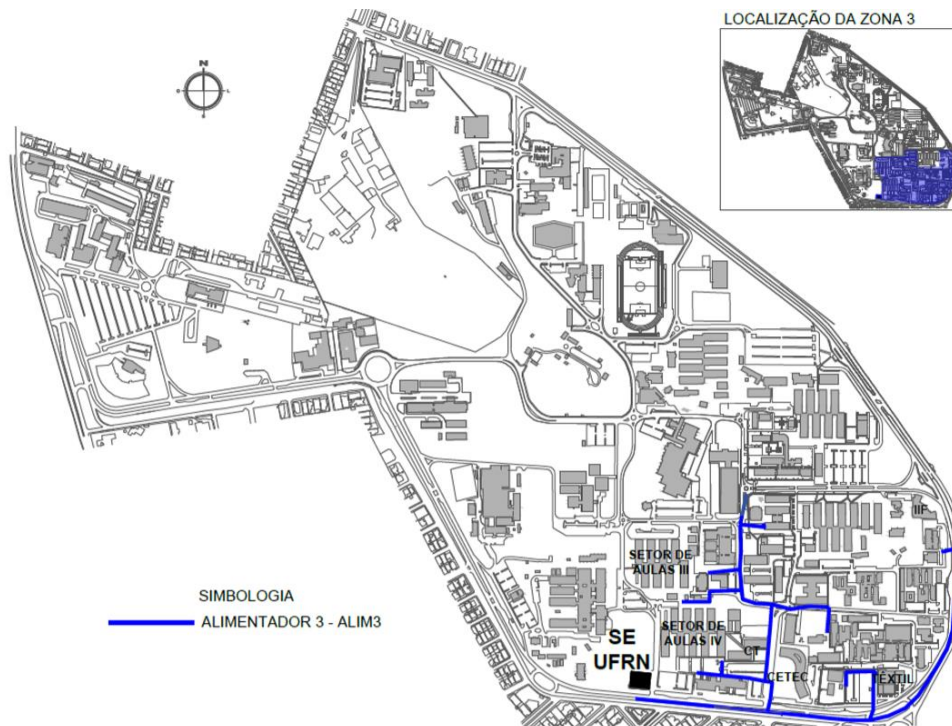


Figura 17 – Percurso do alimentador 3 na Planta do Campus Central

Fonte: (PAIVA, 2019)

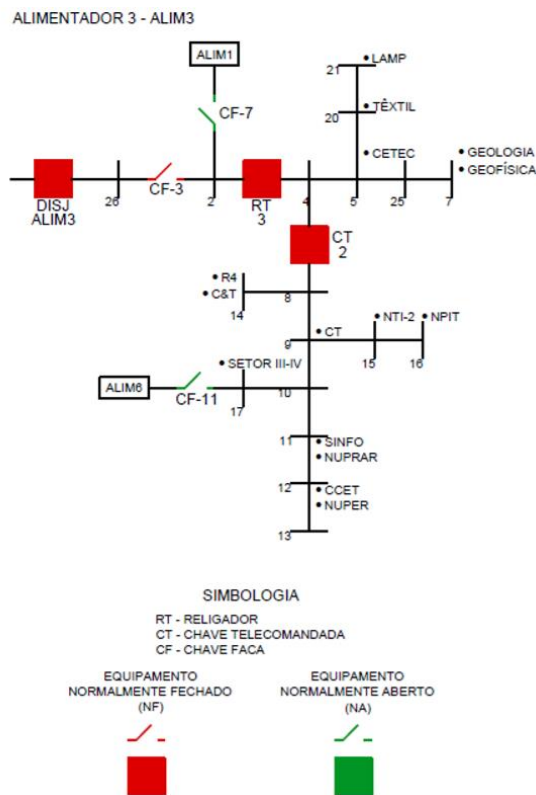


Figura 18 – Diagrama Unifilar do alimentador 3

Fonte: (PAIVA, 2019)

1.11.3.1 Potência no alimentador 3

Outra característica importante para o sistema é estimar a potência média que passa em cada alimentador, com base nas cargas que estão ligadas nele. Para isso fez-se um estudo do alimentador 3.

Para se fazer essa estimativa, primeiro tem-se que coletar a corrente do alimentador em estudo e considerar a tensão de 13,8 kV e fator de potência 0,8. Depois deve-se encontrar o fator multiplicador (FM), o qual é calculado pela equação (4.1) e com ele é possível determinar a potência aparente de cada subestação (PAIVA, 2019).

$$FM = \frac{\sum \text{potência dos transformadores do alimentador}}{\text{Potência do alimentador}} \quad (4.1)$$

Para saber o fator que será aplicado em cada subestação por alimentador, é necessário saber o somatório da potência dos transformadores por alimentador. Na tabela 8 são apresentados os valores da potência dos transformadores de cada alimentador.

Após conhecer a corrente do alimentador 3 que é de 106 A, é possível estimar a potência do mesmo alimentador considerando a tensão de 13,8 kV, pode-se chegar a um valor de 2533,82 kVA.

Com base no valor da soma das potências dos transformadores e da estimativa da potência do alimentador 3, pode-se chegar ao fator multiplicativo, com base na equação (4.1), o qual tem o valor de 0,4006.

Tabela 8 - Potência dos Transformadores no Alimentador 3

CÓDIGO	NOMENCLATURA	POTÊNCIA DOS TRANSFORMADORES (KVA)
SE – 301A	CETEC	1000
SE – 303A	GEOLOGIA	450
SE – 304P	GEOFÍSICA	225
SE – 306P	Reservatório 4	75
SE – 307A	CeT	1000
SE – 308P	CT	225
SE – 309B	NPIT	300
SE – 310A	NTI-2	600
SE – 311A	SETOR III – IV	450
SE – 312A	SINFO	375
SE – 313B	NUPRAR	300
SE – 314A	CCET	500
SE – 315B	NUPER	300
SE – 316A	TEXTIL	300
SE – 317P	LAMP	225
SOMA		6325

Fonte: (PAIVA, 2019)

1.11.4 Subestações

As subestações que irão ser objetos de estudo neste trabalho são as subestações do CTEC e do CCET, que estão localizadas na figura 19 representadas pelos prédios de cor vermelha, onde o menor prédio é a subestação do CCET e o maior prédio é onde fica localizado a subestação do CTEC, elas foram escolhidas por terem os piores resultados sob o aspecto da distorção harmônica entre todas as subestações que foram possíveis fazer essa medição.

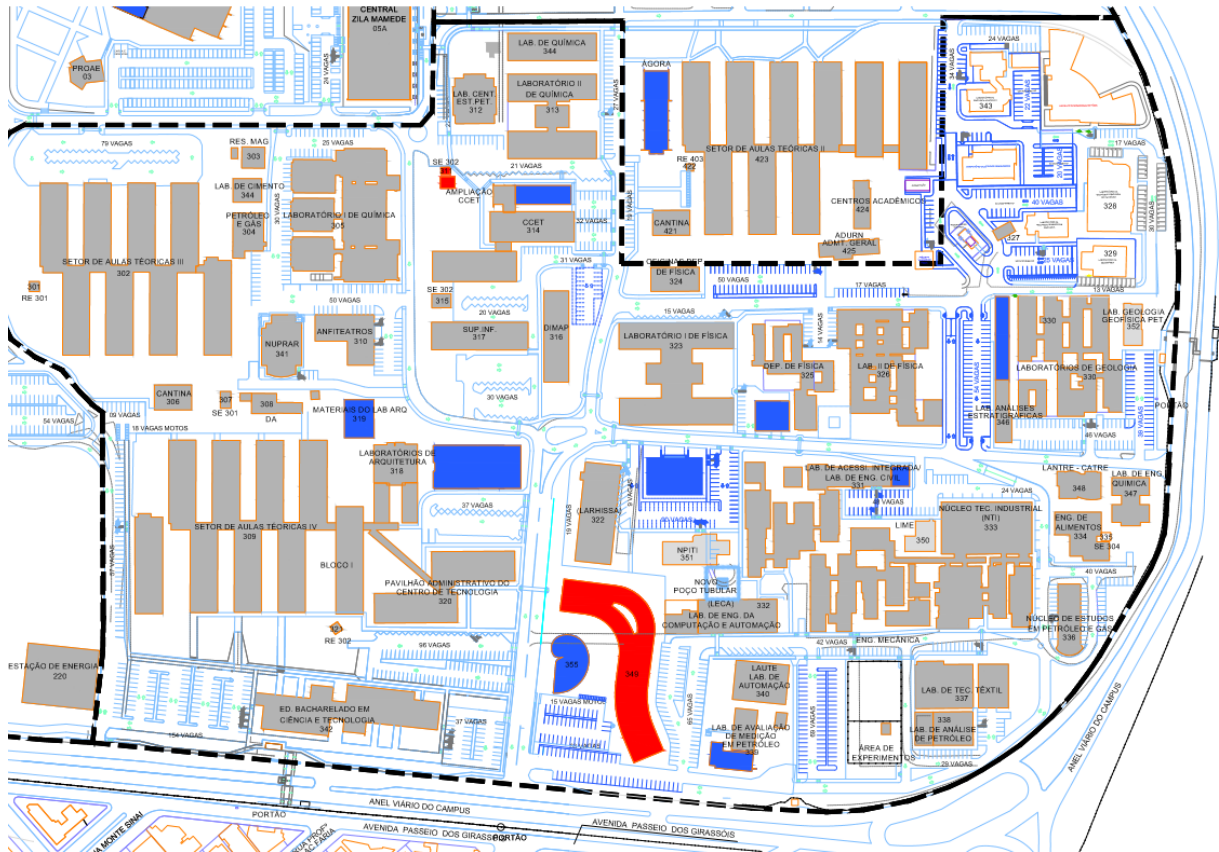


Figura 19 – Localização das subestações do CTEC E CCET

Fonte: (PAIVA, 2019)

A subestação do CTEC tem as principais características de ter uma potência de 1000 kVA e ser abrigada. Além disso a tabela 9 mostra as características dos dois transformadores que estão ali instalados.

Assim como a subestação do CTEC, a subestação do CCET também é abrigada, mas tem uma potência menor de cerca de 500 kVA. A tabela 10 mostra as características do único transformador presente no local.

Tabela 9 – Informações técnicas dos transformadores 1 e 2 da subestação do CTEC

Transformador 1		Transformador 2	
Tipo	Trifásico a seco	Tipo	Trifásico a seco
Data da Fabricação	02/2012	Data da Fabricação	02/2014
Refrigeração	AN	Refrigeração	AN
Volume do Líquido Isolante	--	Volume do Líquido Isolante	--
Peso Total	1500 Kg	Peso Total	1223 Kg
Potência Nominal	500 kVA	Potência Nominal	500 kVA
Impedância	5,58%	Impedância	5,72%

Fonte: (PAIVA, 2019)

Tabela 10 - Informações técnicas do transformador da subestação do CCET

Transformador	
Tipo	Trifásico a óleo
Data da Fabricação	04/2007
Refrigeração	ONAN
Volume do Líquido Isolante	500 L
Peso Total	1600 Kg
Potência Nominal	500 kVA
Impedância	4,80 %

Fonte: (PAIVA, 2019)

1.11.4.1 Impedância de Thévenin dos pontos de medição

Para uma implementação de uma simulação mais realista é necessário se obter a impedância equivalente no ponto de medição, para isso coletou-se diversos dados do sistema como o equivalente de Thévenin visto pela subestação de 69 kV da UFRN, a impedância da linha de 13,8 kV do alimentador 3 do Campus, que liga a subestação de 69 kV as demais subestações da Z3 e as impedâncias dos transformadores envolvidos no estudo.

Para se obter os valores de indutância e resistência da linha, ou seja, sua impedância, é necessário calcular esses parâmetros usando como base os valores do cabo de cobre nu de 50 mm², a resistência é obtida com base numa tabela da Nambei (2019) e a indutância é determinada pela equação (4.2).

$$L_{ext} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt[3]{D_{13} + D_{23} + D_{12}}}{R \cdot e^{-1/4}} \right) \quad (4.2)$$

Com base na equação (4.2), no posicionamento do cabo determinado pela figura 20, e no comprimento do alimentador até a subestação em estudo é que conseguiu-se chegar aos valores de impedância da linha. A tabela 11 e 12 mostram os valores dos parâmetros das linhas e os valores de resistência e indutância delas.

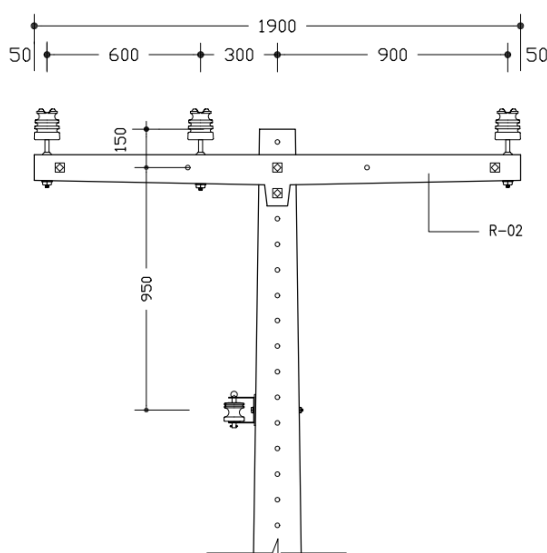


Figura 20 – Estrutura usada nos alimentadores da UFRN

Fonte: (COSERN, 2011)

Tabela 11 – Resistência e Indutância da linha de transmissão até a Subestação do CTEC

	D_{12}	D_{12}	D_{12}	Raio	Distância (m)	Valor
Indutância	120 cm	60 cm	180 cm	3,9894 mm	450	2,75 $* 10^{-4} H$
Resistência	0,272 Ω/km				450	0,1224 Ω

Fonte: Próprio Autor

Tabela 12 - Resistência e Indutância da linha de transmissão até a Subestação do CCET

	D_{12}	D_{12}	D_{12}	Raio	Distância (m)	Valor
Indutância	120 cm	60 cm	180 cm	3,9894 mm	750	4,85 $* 10^{-4} H$
Resistência	0,272 Ω/km				750	0,204 Ω

Fonte: Próprio Autor

Baseado nesses valores de resistência e indutância pode-se chegar ao valor da impedância na linha, o qual seria $R + j\omega L$, onde o ω é a velocidade angular, que gira em torno de um valor de 377 rad/s, e o ωL é a reatância indutiva, o qual resulta em um valor de $0,1224 + j0,103675 \Omega$ para a subestação do CTEC e $0,204 + j0,182 \Omega$ para a subestação do CCET.

Por fim, como se trata de um sistema radial para se obter o valor da impedância equivalente em cada subestação basta somar todos os dados coletados do sistema, em relação a tensão de base 380 V e a potência de base de 100 MVA, que estão representados pela tabela 13, com um porém de se fazer o paralelo das impedâncias dos transformadores da subestação do CTEC.

Tabela 13 – Impedâncias do sistema

	Subestação CTEC		Subestação CCET
Equivalente de Thevenin – Subestação 69 kV UFRN	$3,4887 * 10^{-5} + j1,7306 * 10^{-4} \Omega$	Equivalente de Thevenin – Subestação 69 kV UFRN	$3,4887 * 10^{-5} + j1,7306 * 10^{-4} \Omega$
Transformador Subestação 69 kV	$j1,1956 * 10^{-4} \Omega$	Transformador Subestação 69 kV	$j1,1956 * 10^{-4} \Omega$
Transformador CTEC – Paralelo	$j4,05 * 10^{-5} \Omega$	Transformador CCET	$j6,933 * 10^{-5} \Omega$
Linha de Transmissão	$9,2809 * 10^{-5} + j7,8610 * 10^{-5} \Omega$	Linha de Transmissão	$1,5468 * 10^{-4} + j1,3800 * 10^{-4} \Omega$
Impedância Equivalente Total	$1,2769 * 10^{-4} + j4,11 * 10^{-4} \Omega$	Impedância Equivalente Total	$1,895 * 10^{-4} + j4,99 * 10^{-4} \Omega$
Obs: Vbase = 380 V Sbase = 100 MVA			

Fonte : Próprio Autor

1.12 Analisador de Energia – CW500

Para se obter os valores das distorções harmônicas usou-se um analisador de energia da YOKOGAWA®, cujo modelo é o CW500 (Figura 21) (YOKOGAWA, 2017). Ele é uma ferramenta capaz de medir e listar até o harmônico de ordem 50, além de

capturar os eventos que degradam a qualidade da energia, como por exemplo interrupção da tensão, desbalanceamento das fases entre outros.

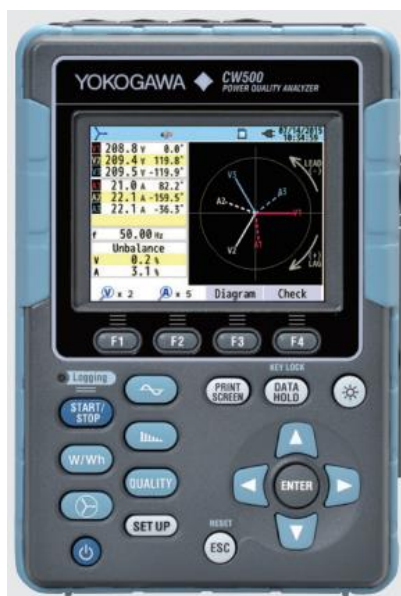


Figura 21 - CW500

Fonte: (YOKOGAWA, 2017)

Para efetuar a medição, além do analisador em si, tem-se 4 sondas com braçadeiras (figura 22), cujo modelo é o 96065, para a coleta dos dados das correntes e 4 presas para a coleta de dados da tensão. Como os sistemas em estudo são trifásicos com quatro fios, a melhor representação que se pode fazer da ligação do analisador está ilustrado na figura 23.

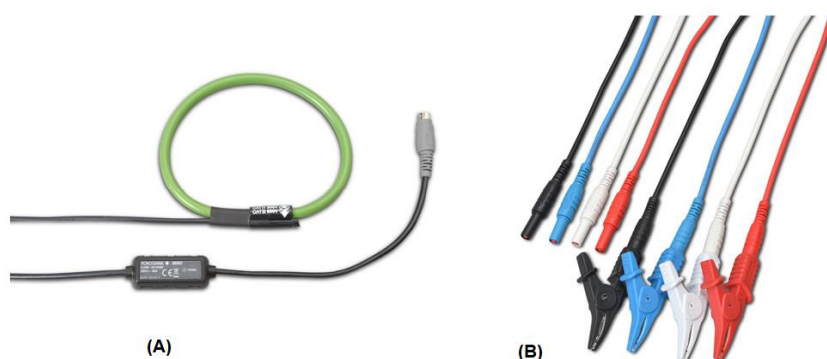


Figura 22 - Sondas de correntes com braçadeiras (a) e presas para coletar a tensão (b)

Fonte: (YOKOGAWA, 2017)

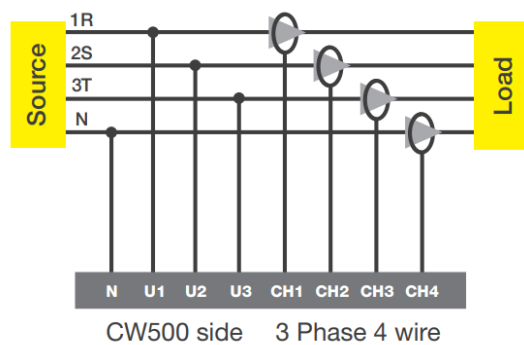


Figura 23 - Ligação do Analisador em um sistema trifásico a quatro fios

Fonte: (YOKOGAWA, 2017)

Na tabela 14 são apresentadas algumas especificações técnicas, a fim de esclarecer quais são seus limites e precisões máximos para qualquer sistema.

Por fim a figura 24 mostra como foi feita a medição na subestação do CTEC, a medição ocorreu no quadro de baixa tensão de 380/220 V junto com o disjuntor geral, da mesma forma ocorreu na subestação do CCET.

Já na tabela 15 tem-se todas as normas que são aplicáveis ao analisador de energia em destaque.

Tabela 14 - Especificações - CW500

Modelo	CW500
Conexões	1P2W / 1P3W / 3P3W / 3P4W
Medições	Tensão, Corrente, Frequência, Potência/Energia Ativa, Reativa e aparente, Fator de Potência, Fase, Corrente no neutro, Demanda, Harmônicos, Qualidade de energia.
Tensão (RMS)	V _{max} = 600 / 1000 V
	Precisão = ±0.2% (40 – 70 Hz)
	Entrada permitida = 1 a 120% (RMS), 200% Pico
Corrente (RMS)	96065: I _{max} = 100/1000 A
	Precisão = ±0.2% (40 – 70 Hz)
	Entrada permitida = 1 a 110% (RMS), 200% Pico
Potência Ativa	Precisão = ±0.3% (40 – 70 Hz / Fator de Potência = 1)
	Efeito do Fator de Potência = ±1.0% (40 – 70 Hz / Fator de Potência = 0.5)
Frequência	40 a 70 Hz
Temperatura de Operação	0 a 45°C, Humidade menos que 85%
Dimensões	120 mm (Largura) x 175 mm (Altura) x 68 mm (Profundidade)
Peso	900 g

Fonte: (YOKOGAWA, 2017)

Tabela 15 - Normas aplicadas - CW500

Normas de Segurança	EN 61010-1 CAT IV 300 V, CAT III 600 V, CAT II 1000 V, Poluição nível 2 EN 61010-2-030 EN 61010-2-033 EN 61010 - 031
EMC	EN 61326-1 Classe A Tabela 2 EM 55011 Classe A Grupo 1
Qualidade de Energia	IEC 61000-4-30 ed. 2 Classe S, IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-7

Fonte: (YOKOGAWA, 2017)

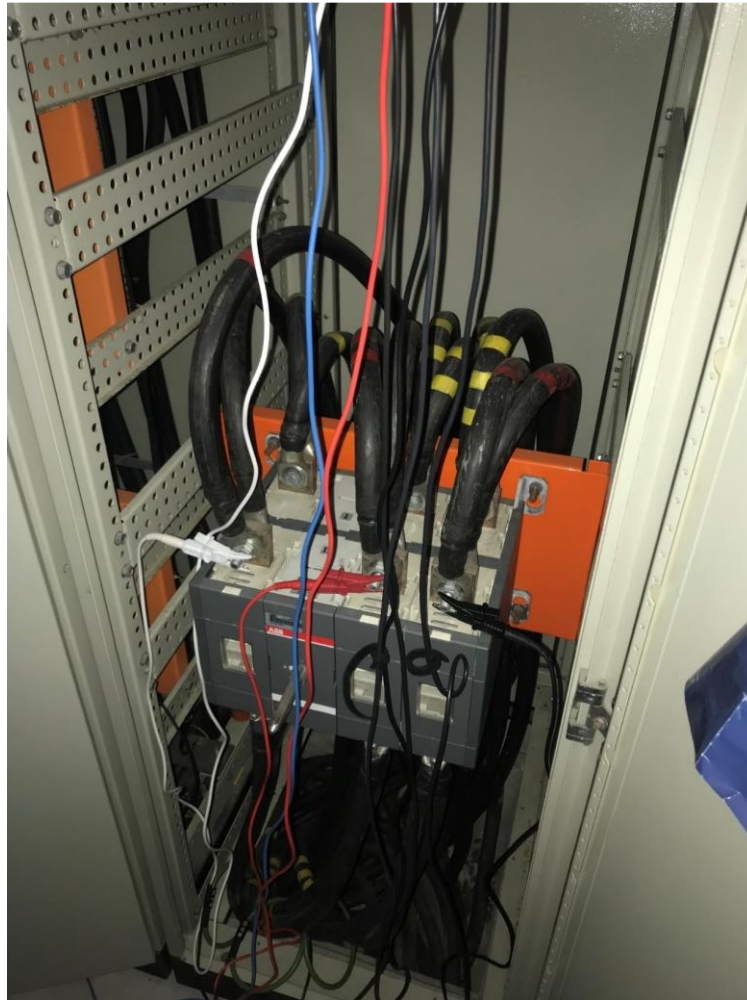


Figura 24 - Medição ocorrida na Subestação do CTEC

Fonte: Próprio autor

1.13 Simulação

1.13.1 Filtro Ativo

Para a simulação será utilizado um filtro ativo paralelo, cuja topologia será a Split-Capacitor. Essa topologia utiliza um inversor trifásico comum dotado de três braços, e um barramento CC composto por dois capacitores com um ponto médio entre eles aterrado. Onde o ponto médio fornece um caminho para a corrente de neutro permitindo a sua utilização em filtros ativos trifásicos a quatro fios. Esta topologia necessita de uma estratégia adequada no controle da tensão do barramento

CC de forma a manter o balanço das tensões nos dois capacitores (Feracin, 2009).

Esta topologia é uma escolha apropriada quando se trata de sistemas elétricos de média e baixa potências, que é o caso das subestações estudadas, por apresentar um número relativamente reduzido de chaves. Em aplicações com um nível elevado de potência essa topologia não é adequada (Feracin, 2009).

A figura 25 mostra como é a topologia split-capacitor abordada no trabalho.

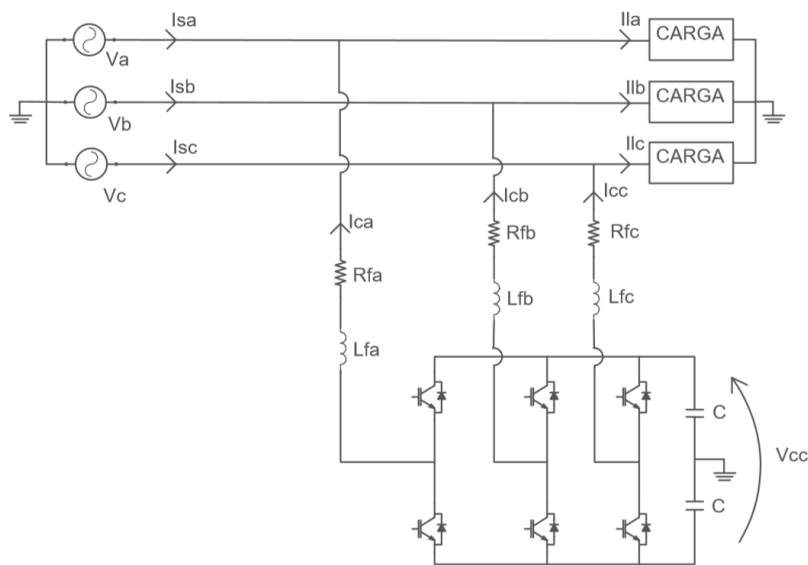


Figura 25 – Filtro Ativo Paralelo topologia Split-Capacitor

Fonte: Próprio autor

1.13.1.1 Modelo do filtro ativo paralelo

Para um estudo mais preciso do sistema de controle do filtro ativo é necessário a obtenção da função de transferência dele. Por esse motivo representa-se o diagrama de blocos do filtro ativo com base na figura 26. Parte-se do pressuposto que o ganho do inversor PWM seja unitário, ou seja, desconsiderando possíveis perdas, como também do sensor $H(S)$.

A função de transferência do controlador PI é dada pela equação (4.3).

$$G_C(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (4.3)$$

Já o modelo da planta, ou seja, o sistema físico, é composto por uma indutância em série com uma resistência conforme a figura 25 mostra. A equação (4.4)

representa a função de transferência da planta considerada na malha de corrente, a qual pode ser da estratégia p-q e SRF e serão explicadas no capítulo seguinte.

$$G_p(s) = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (4.4)$$

Baseando-se na figura 19 e nas equações (4.3) e (4.4) pode-se chegar na função de transferência de malha fechada que é definida pela expressão (4.5).

$$G(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_f \cdot s^2 + (R_f + K_p) \cdot s + K_i} \quad (4.5)$$

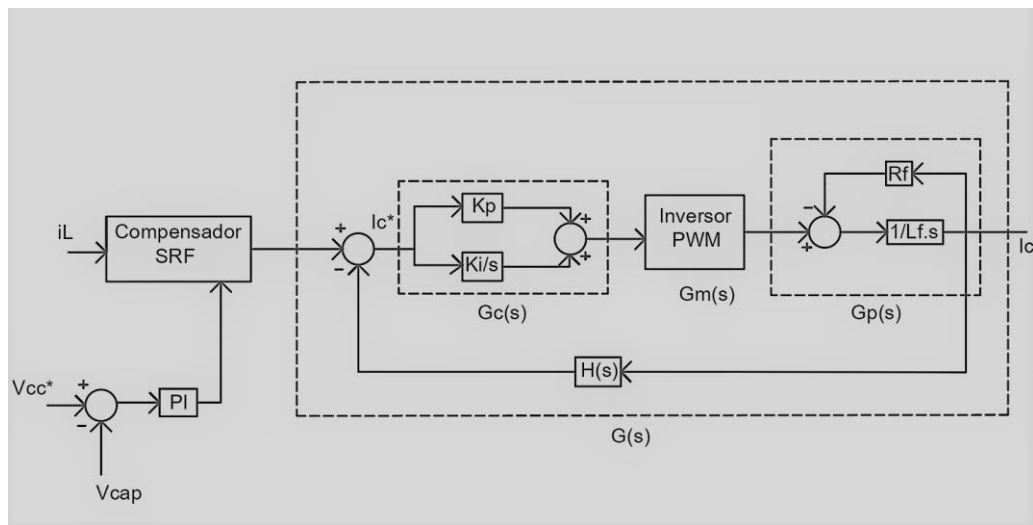


Figura 26 – Diagrama de blocos da malha de controle de corrente do Filtro ativo de potência

Fonte: Próprio autor

1.13.1.2 Modelo do sistema de controle da tensão do barramento cc

A modelagem do sistema de controle de tensão do barramento cc será realizada segundo Silva (2001), em que o diagrama de blocos da malha de tensão do filtro ativo está ilustrado na figura 27. Onde $(G_c(s) = K_p + K_i/s)$ representa o controlador PI e $(G_{inv}(s) = 1)$ representa a função de transferência do inversor.

A função de transferência em malha fechada do diagrama de blocos da figura 20 é dada pela equação (4.6).

$$G_{MF}(s) = \frac{\frac{K_i \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}} \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{s^2 + \frac{K_p \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}} \cdot s + \frac{K_i \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}}} \quad (4.6)$$

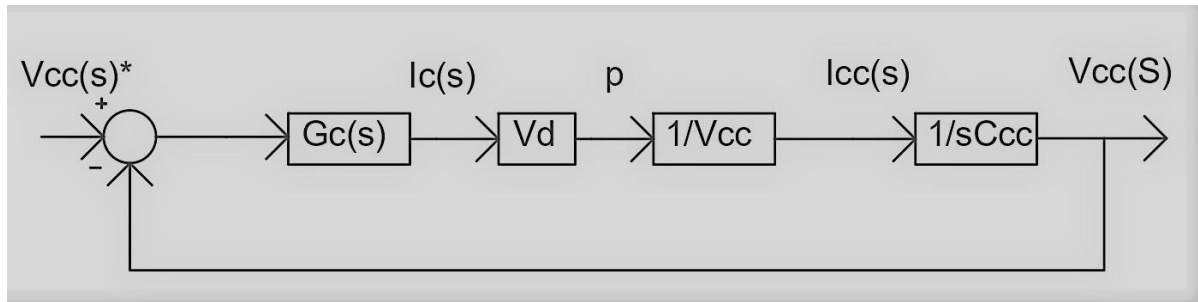


Figura 27 – Diagrama de blocos da malha de controle de tensão do Filtro ativo de potência

Fonte: Próprio autor

1.13.1.3 Dimensionamento dos capacitores do barramento cc e dos indutores de acoplamento do inversor

Para o dimensionamento do capacitor do barramento CC admitiu-se que a potência máxima que o Filtro ativo de potência deva processar seja igual a 30% da soma das potências das cargas e que esta potência tenha a forma senoidal (Feracin, 2009). Foi Considerado uma regulação de $\varepsilon = 0,15$ e uma frequência de ondulação igual a 120 Hz no barramento CC.

$$C_{cc} = \frac{P_M}{W_h \cdot \varepsilon \cdot V_c^2} = \left[\frac{(23657+24050+26790) \cdot 0,3 \cdot \sqrt{2}}{120 \cdot 0,15 \cdot 450^2} \right] = 8,58mF \quad (4.7)$$

No circuito simulado foi adotado $C_{cc} = 9$ mF para a subestação do CTEC e usando a mesma fórmula resultou em $C_{cc} = 40$ μ F para a subestação do CCET.

Para a tensão do sistema de fase de 220 V_{eff}, a tensão de pico será de aproximadamente de 311 V. Normalmente se utiliza uma tensão de barramento CC maior que o pico da fonte de tensão. É comum que o valor da tensão no barramento CC se situe entre 25% a 50% acima do valor de pico da tensão da fonte (KHADKIKAR; CHANDRA, 2008). Neste trabalho adotou-se um valor de tensão, aproximadamente, 40% maior que a tensão de pico portanto 450 V. Devido às características do Filtro Ativo trifásico com topologia split-capacitor, o barramento CC deverá ter o dobro desta tensão, portanto, V_{cc}=900 V, o qual é a soma da tensão nos dois capacitores.

O indutor L_f funciona como um filtro atenuando as ondulações causadas pelo chaveamento, além de fazer o acoplamento entre o inversor e a rede. O aumento de valor deste diminui a ondulação da corrente de compensação sintetizada pelo o inversor. Porém, o indutor interfere na resposta dinâmica do filtro quando estão

presentes correntes com alta variação. Portanto, o indutor de acoplamento L_f deve ser dimensionado levando-se em conta a diminuição da ondulação da corrente e o empobrecimento da resposta dinâmica do Filtro Ativo (Feracin, 2009). Neste trabalho o valor do indutor foi ajustado através das simulações e foi adotado o valor de 0,1mH com uma resistência equivalente de 0,05Ω.

1.13.2 Dimensionamento do filtro passivo RLC série shunt de 3ª e 5ª ordem

Através dos resultados coletados das simulações, constatou-se que os harmônicos de 3ª e 5ª ordens são os que estão em maior evidência no espectro de frequência, por esse motivo eles foram os escolhidos para a implementação dos filtros passivos.

Para o dimensionamento foi utilizada a equação (4.8), a qual resulta no valor da resistência, juntamente com as equações (4.9) e (4.10) que resultam nos valores de indutância e capacitância desse tipo de filtro.

$$R = \frac{K \cdot I_1}{(I_h^2 - k^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_S \cdot K \cdot I_1 + \sqrt{(R_S \cdot I_1)^2 + (h \cdot w \cdot L_S)^2 \cdot (I_h^2 - k^2 \cdot I_1^2)} \right] \quad (4.8)$$

$$L = \frac{R \cdot Q}{h \cdot w} \quad (4.9)$$

$$C = \frac{1}{h \cdot w \cdot R \cdot Q} \quad (4.10)$$

Em que o Q é o fator de qualidade do filtro cujo valor é 50, o K é a constante de distorção cujo valor foi escolhido em 0,12 para 3ª ordem e 0,0025 para 5ª ordem, h a ordem do harmônico que foi escolhido para ser filtrado (Moraes, 2011).

Capítulo 5

SIMULAÇÕES E RESULTADOS

1.14 Considerações Iniciais

Para a realização das simulações, primeiramente, deve-se coletar os dados das distorções harmônicas tanto de tensão como de corrente do PAC, que neste caso é o barramento de baixa tensão das subestações estudadas.

As tabelas 16, 17, 18 e 19 mostram os valores das harmônicas de corrente e tensão individuais, respectivamente, com seus índices de distorção harmônica, defasagem de cada harmônica, fator de potência e potência ativa, da subestação do CTEC e CCET às 14:30 do dia 21/03/2019 e 14:30 do dia 03/09/2019 respectivamente, juntamente com essas tabelas foram elaboradas as figuras 28, 29, 30 e 31 que são as formas de onda da corrente e tensão nas subestações abordadas, cujos gráficos foram retirados da simulação do PSIM®.

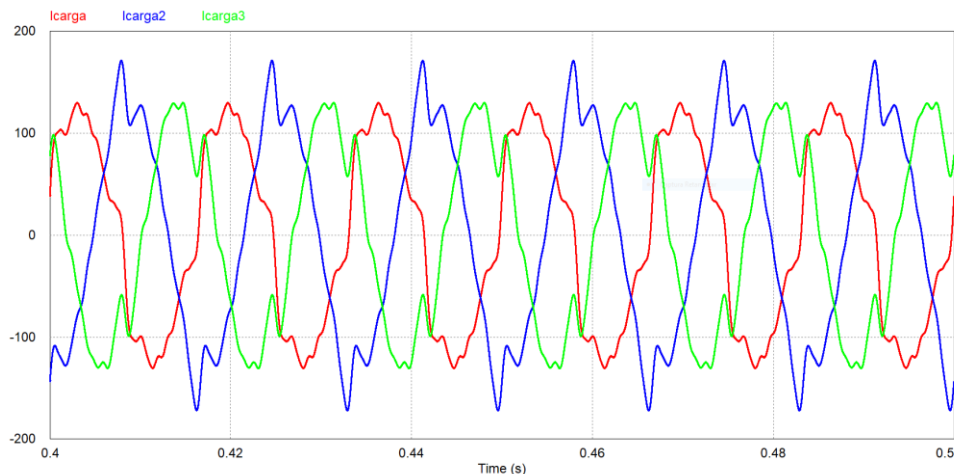


Figura 28 –Corrente na carga na subestação do CTEC

Fonte: Próprio Autor

Tabela 16 – Harmônicos de corrente coletados na subestação da CTEC

	Fase A	Ang. A	Fase B	Ang. B	Fase C	Ang. C
N = 1 (Fund.)	126,20 A	18,7°	125,60 A	139,2 °	141,81 A	-100,4 °
N=2	0,0159 A	-29,1 °	0,0135 A	-22,7 °	0,0732 A	-11,6 °
N=3	10,161 A	-13,5 °	14,648 A	-13,5 °	12,248 A	-11,8 °
N=4	0 A	-24,4 °	0 A	-24,4 °	0 A	-24,4 °
N=5	12,452 A	2,84 °	11,170 A	5,86 °	12,446 A	-4,70 °
N=6	0 A	-27,2 °	0 A	-27,4 °	0 A	-27,2 °
N=7	12,067 A	0,35 °	12,623 A	-3,89 °	12,046 A	2,19 °
N=8	0 A	-28,5 °	0 A	-28,5 °	0 A	-28,5 °
N=9	4,8280 A	-8,38 °	5,9333 A	-2,97 °	5,1352 A	-7,67 °
N=10	0 A	-28,3 °	0 A	-28,3 °	0 A	-28,3 °
N=11	0,9177 A	-5,72 °	1,4101 A	-1,89 °	0,9587 A	14,9 °
N=12	0 A	-28,1 °	0 A	-28,1 °	0 A	-28,1 °
N=13	2,9971 A	4,98 °	2,7698 A	0,67 °	3,0758 A	-3,70 °
N=14	0 A	-28,0 °	0 A	-28,0 °	0 A	-28,01 °
N=15	0,7766 A	0,66 °	0,7775 A	1,75 °	0,8544 A	-4,45 °
N=16	0 A	-24,8 °	0 A	-24,8 °	0 A	-24,8 °
N=17	1,9801 A	3,56 °	1,9129 A	-5,58 °	1,5130 A	3,65 °
N=18	0 A	-24,6 °	0 A	-24,6 °	0 A	-24,6 °
N=19	1,3211 A	4,17 °	0,3932 A	4,72 °	0,6934 A	3,88 °
THDi	16,7 %		18,6%		15,4%	
P(kW)	26,46		26,08		29,98	
F.P.	0,9303		0,9338		0,9253	

Fonte: Próprio Autor

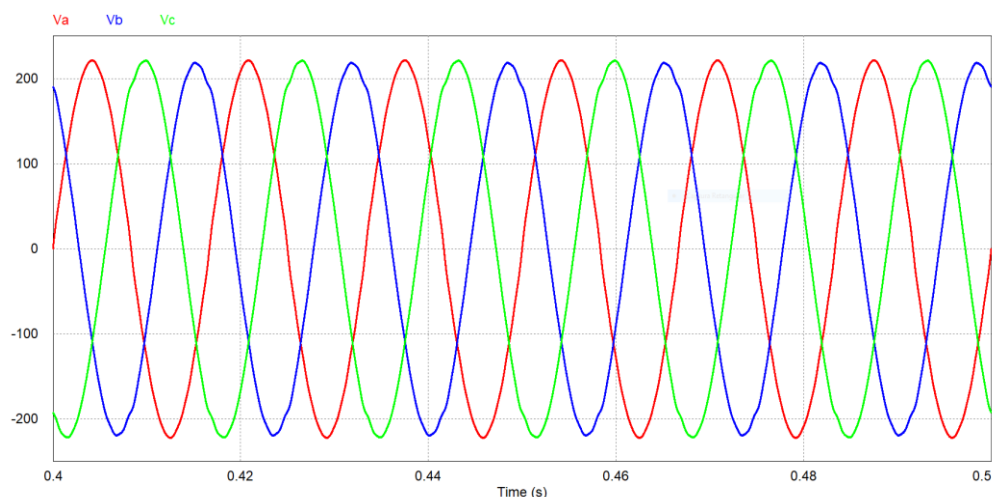


Figura 29 – Tensão na carga na subestação do CTEC

Fonte: Próprio Autor

Tabela 17 - Harmônicos de tensão coletados na subestação da CTEC

	Fase A	Ang. A	Fase B	Ang. B	Fase C	Ang. C
N = 1 (Fund.)	220,30 V	0°	219,38 V	119,6 °	221,90 V	-120,16 °
N=2	0,0556 V	-31,3 °	0,0487 V	-32,8 °	0,0615 V	-15,9 °
N=3	0,3660 V	9,74 °	0,9954 V	4,40 °	0,8090 V	14,8 °
N=4	0 V	-24,4 °	0 V	-24,4 °	0 V	-24,4 °
N=5	1,7382 V	5,62 °	1,8202 V	2,37 °	1,7652 V	-6,22 °
N=6	0 V	-27,2 °	0 V	-27,2 °	0 V	-27,2 °
N=7	0,8467 V	-9,42 °	0,7089 V	4,30 °	0,8071 V	3,80 °
N=8	0 V	-28,5 °	0 V	-28,5 °	0 V	-28,55 °
N=9	1,0806 V	-4,18 °	1,2416 V	-5,50 °	0,8872 V	-5,71 °
N=10	0 V	-28,3 °	0 V	-28,3 °	0 V	-28,3 °
N=11	0,2668 V	-3,15 °	0,4416 V	-4,57 °	0,4975 V	-2,33 °
N=12	0 V	-28,1 °	0 V	-28,1 °	0 V	-28,1 °
N=13	0,2223 V	3,58 °	0,1980 V	0,01 °	0,4243 V	-0,63 °
N=14	0 V	-28,0 °	0 V	-28,0 °	0 V	-28,0 °
N=15	0,2911 V	2,67 °	0,2768 V	-0,73 °	0,3143 V	4,90 °
N=16	0 V	-24,8 °	0 V	-24,8 °	0 V	-24,8 °
N=17	0,7783 V	-10,8 °	0,7449 V	9,93 °	0,5855 V	0,45 °
N=18	0 V	-24,6 °	0 V	-24,6 °	0 V	-24,6 °
N=19	0,5903 V	0,81 °	0,1752 V	-2,62 °	0,3296 V	2,52 °
THDv	1,43%		1,70%		1,48%	

Fonte: Próprio Autor

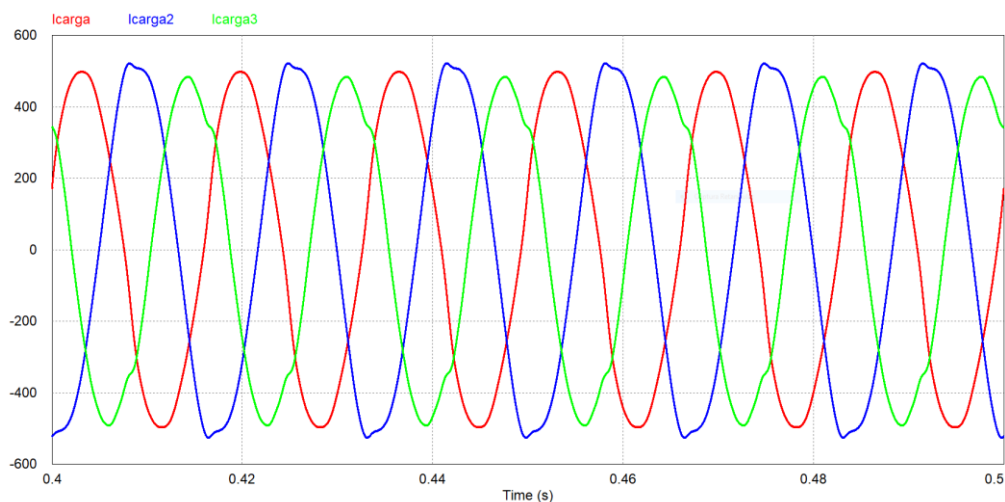


Figura 30 - Corrente na carga na subestação do CCET

Fonte: Próprio Autor

Tabela 18 - Harmônicos de corrente coletados na subestação da CCET

	Fase A	Ang. A	Fase B	Ang. B	Fase C	Ang. C
N = 1 (Fund.)	514,74 A	19,3 °	545,36 A	-105,3 °	493,21 A	136,12 °
N=2	2,7179 A	-2,44 °	2,6662 A	-4,57 °	2,4493 A	5,57 °
N=3	24,468 A	5,25 °	25,672 A	4,18 °	29,078 A	5,66 °
N=4	0,1441 A	-2,90 °	0,1667 A	-8,39 °	0,1968 A	0,40 °
N=5	12,737 A	-2,67 °	11,809 A	5,06 °	13,690 A	-3,55 °
N=6	0,0834 A	-3,63 °	0,0230 A	-3,85 °	0,0153 A	-1,03 °
N=7	3,2101 A	6,20 °	3,3590 A	0,45 °	6,3632 A	-4,36 °
N=8	0,0043 A	-0,18 °	0,0043 A	-0,78 °	0,0071 A	0,51 °
N=9	3,3118 A	2,01 °	2,2870 A	0,48 °	2,2586 A	-1,00 °
N=10	0 A	-0,50 °	0 A	-0,50 °	0 A	-0,5 °
N=11	1,2270 A	2,78 °	0,7532 A	-3,57 °	2,1400 A	2,83 °
N=12	0 A	0,57 °	0 A	0,57 °	0 A	0,57 °
N=13	1,0675 A	-0,15 °	0,6184 A	1,87 °	1,7709 A	2,33 °
N=14	0 A	-0,14 °	0 A	-0,14 °	0 A	-0,14 °
N=15	0,5310 A	2,44 °	0,4875 A	3,99 °	1,4343 A	1,62 °
N=16	0 A	-0,26 °	0 A	-0,26 °	0 A	-0,26 °
N=17	0 A	-0,92 °	0,0937 A	-8,94 °	0,0347 A	-1,92 °
N=18	0 A	-1,38 °	0 A	-1,38 °	0 A	-1,38 °
N=19	0 A	-2,24 °	0,0024 A	-3,29 °	0,2709 A	3,85 °
THDi	5,45%		5,24%		6,68%	
P(kW)	109,5		117,8		106,4	
F.P.	0,9418		0,9632		0,9591	

Fonte: Próprio Autor

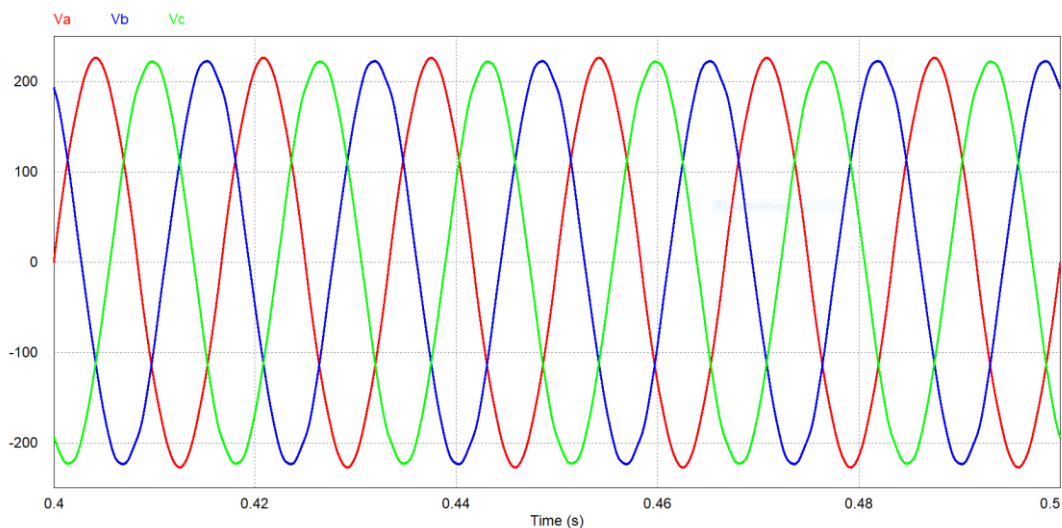


Figura 31 - Tensão na carga na subestação do CCET

Fonte: Próprio Autor

Tabela 19 - Harmônicos de tensão coletados na subestação da CCET

	Fase A	Ang. A	Fase B	Ang. B	Fase C	Ang. C
N = 1 (Fund.)	225,12 V	0 °	223,51 V	-120,25 °	223,89 V	120,14 °
N=2	0,0332 V	-6,19 °	0,0302 V	-13,81 °	0,0231 V	10,43 °
N=3	0,3526 V	4,81 °	0,6022 V	-4,83 °	0,4316 V	-5,44 °
N=4	0 V	-1,13 °	0 V	-1,13 °	0 V	-1,13 °
N=5	2,2339 V	-4,67 °	1,9783 V	4,53 °	2,4133 V	-4,13 °
N=6	0 V	-1,05 °	0 V	-1,05 °	0 V	-1,05 °
N=7	0,4426 V	0,54 °	0,4921 V	3,23 °	0,637 V	-4,73 °
N=8	0 V	-0,18 °	0 V	-0,18 °	0 V	-0,18 °
N=9	0,0462 V	-3,46 °	0,0184 V	-4,14	0,170 V	3,2 °
N=10	0 V	-0,50 °	0 V	-0,50 °	0 V	-0,5 °
N=11	0,1783 V	2,41 °	0,3850 V	-6,72 °	0,4969 V	-3,33 °
N=12	0 V	0,57 °	0 V	0,57 °	0 V	0,57 °
N=13	0,3811 V	-3,58 °	0,5991 V	1,75 °	0,6278 V	4,56 °
N=14	0 V	-0,14 °	0 V	-0,14 °	0 V	-0,14 °
N=15	0 V	0 °	0,0308 V	-4 °	0,2425 V	-2,11 °
N=16	0 V	-0,26 °	0 V	-0,26 °	0 V	-0,26 °
N=17	0 V	-0,92 °	0 V	-0,92 °	0 V	0,02 °
N=18	0 V	-1,38 °	0 V	-1,38 °	0 V	-1,38 °
N=19	0 V	-2,24 °	0 V	-2,24 °	0 V	-2,24 °
THDv	0,9878%		0,9604%		1,1510%	

Fonte: Próprio Autor

Outro ponto importante que deve ser analisado é a corrente do neutro, com ela pode-se ver o quão desequilibrado está o sistema, desta forma as figuras 32 e 33 ilustram as formas de onda da corrente no neutro tanto no CTEC como no CCET, respectivamente.

Com base nos resultados apresentados, fez-se uma comparação entre os índices de distorção harmônica de corrente e tensão coletados do analisador de energia, com os índices estabelecidos pelas as normas do IEC e IEEE. Desta forma foram elaboradas as tabelas 20 e 21 que faz a comparação dos valores de tensão e corrente respectivamente.

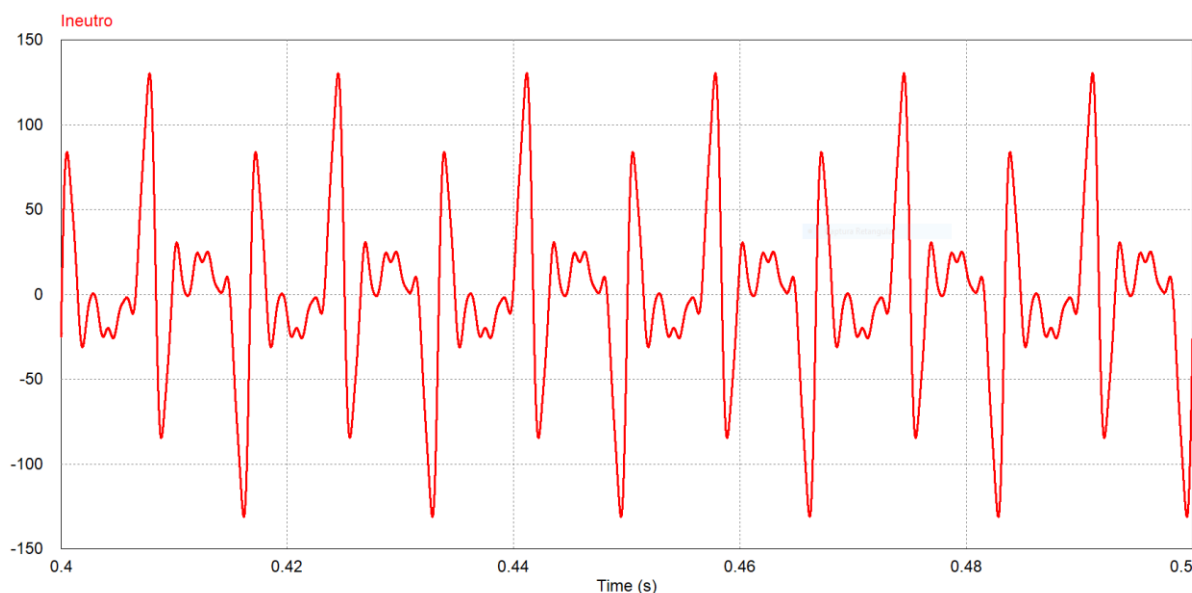


Figura 32 – Corrente do Neutro na Subestação do CTEC

Fonte: Próprio Autor

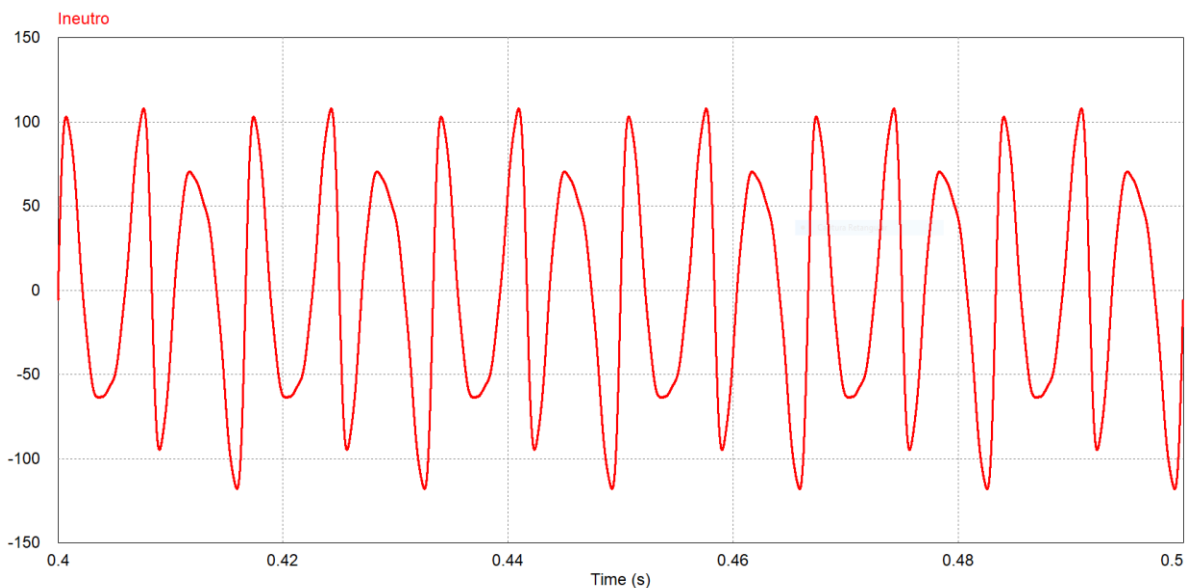


Figura 33 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET

Fonte: Próprio Autor

Tabela 20 – Comparação dos valores de tensão coletados do analisador de energia com as normas vigentes

	CTEC			CCET			Normas	
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	ANEEL PRODIST	IEEE- 519
THDv	1,43%	1,70%	1,48%	0,98%	0,96%	1,15%	10%	5,0%

Fonte: Próprio Autor

Tabela 21 - Comparação dos valores de corrente coletados do analisador de energia com as normas vigentes

Ordem Harmônica	CTEC			CCET			Normas	
	I_n/I_1 Fase A	I_n/I_1 Fase B	I_n/I_1 Fase C	I_n/I_1 Fase A	I_n/I_1 Fase B	I_n/I_1 Fase C	IEC61000- 3-4	IEEE- 519
3	8,0%	11,6%	8,63%	4,7%	4,7%	5,89%	21,6%	15%
5	9,86%	9,31%	8,77%	2,47%	2,16%	5,89%	10,7%	15%
7	9,56%	10,05%	8,49%	0,62%	0,61%	2,77%	7,2%	15%
9	3,82%	4,72%	3,62%	0,64%	0,41%	0,45%	3,8%	15%
11	0,72%	1,12%	0,67%	0,23%	0,13%	0,43%	3,1%	7%
13	2,36%	2,20%	2,16%	0,20%	0,11%	0,35%	2%	7%
15	0,61%	0,61%	0,60%	0,10%	0,08%	0,28%	0,7%	7%

Fonte: Próprio Autor

Dessa forma, pode-se constatar que tanto os harmônicos de tensão das duas subestações como os harmônicos de corrente da subestação do CCET estão dentro

das normas abordadas. Já as harmônicas de corrente da subestação do CTEC mostram desconformidade em algumas harmônicas individuais, o que requer maior atenção no processo de mitigação para que acabe cessando este problema.

1.15 Sistema utilizado na simulação

Com base nas medições do analisador de energia já mostradas, o sistema simulado é representado pela figura 34, que tem como representação das cargas não lineares fontes de corrente em paralelo, em que cada fonte representa um harmônico de corrente, como é demonstrado pela figura 35.

A simulação consiste nas indutâncias equivalente do sistema e do indutor, representadas por R_f , L_f , L_a e R_a , respectivamente, além disso tem-se os filtros passivos de 3ª e 5ª ordens harmônicas tanto do filtro híbrido como do filtro passivo isolado, o inversor de frequência com seu sistema de controle de corrente e tensão e a carga não linear. Todos os valores dos componentes e dos ganhos dos controladores estão inseridos na tabela 22.

Os Ganhos de controladores de corrente e tensão que foram achados, são apresentados no apêndice A.

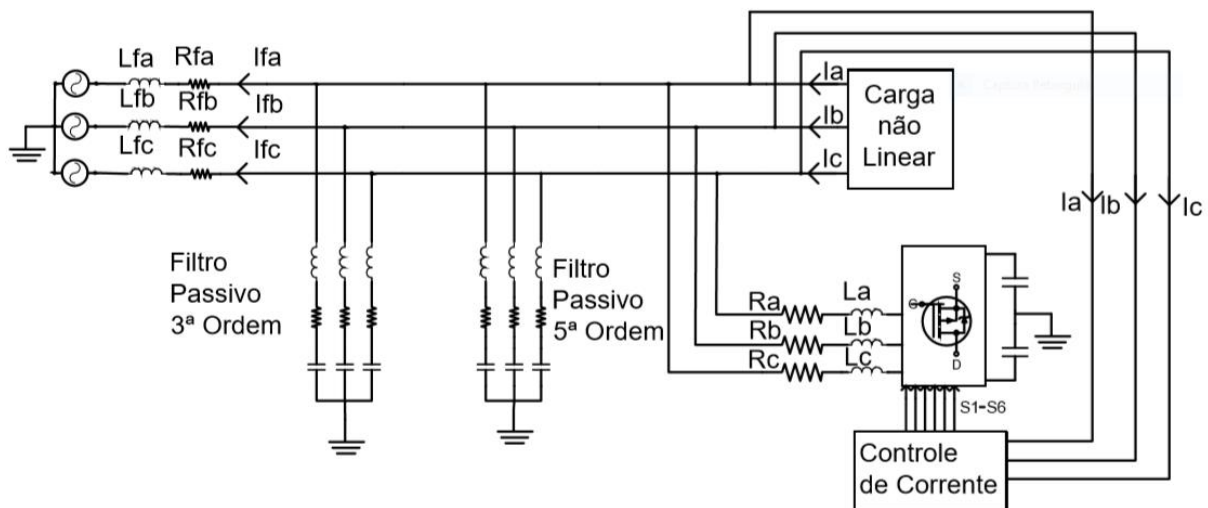


Figura 34 – Sistema utilizado na Simulação

Fonte: Próprio Autor

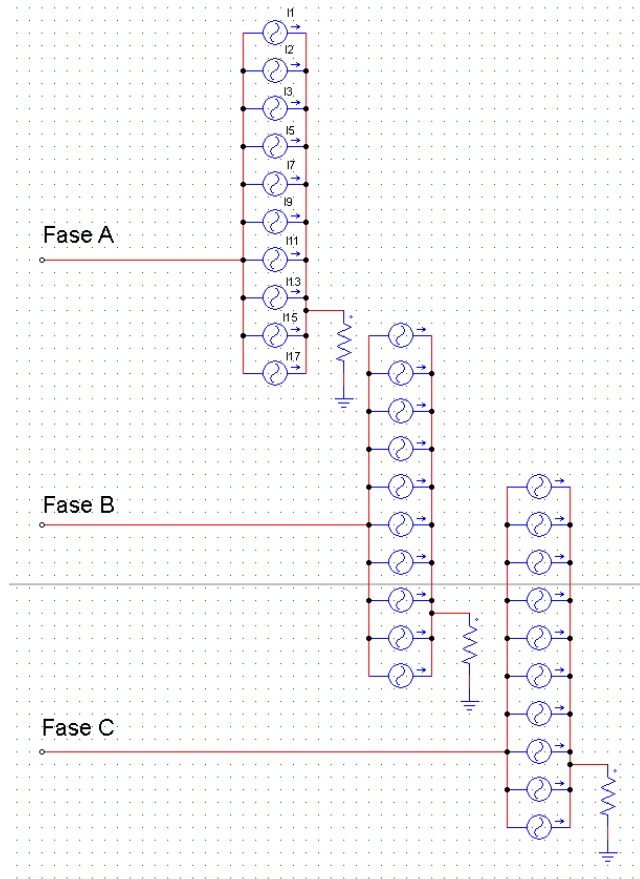


Figura 35 – Representação da Carga não Linear na Simulação

Fonte: Próprio Autor

Tabela 22 – Valores dos Componentes e ganhos do sistema em estudo

Controlador de Corrente	Kp	31,40		
	Ki	1570		
Controlador de Tensão	Kp	0,4018		
	Ki	18,37		
Indutor – Inversor	0,01 mH			
Resistência- Inversor	0,05Ω			
Filtro Passivo 3ª Ordem	CTEC		CCET	
	L	0,069 H	L	0,0431 H
	C	11,33 μF	C	18,127 μF
	R	1,56 Ω	R	0,975 Ω
Filtro Passivo 5ª Ordem	L	0,851 mH	L	0,011 H
	C	0,331 mF	C	25,22 μF
	R	0,032 Ω	R	0,420 Ω
Filtro Passivo 3ª Ordem Filtro Híbrido	L	0,0368 H	L	0,03868 H
	C	21,21 μF	C	20,21 μF
	R	0,833 Ω	R	0,8749 Ω
Filtro Passivo 5ª Ordem Filtro Híbrido	L	0,0784 H	L	0,0959 H
	C	3,588 μF	C	2,93 μF
	R	2,95 Ω	R	3,61679 Ω
Capacitor – Inversor	9 mF		40 μF	

Fonte: Próprio Autor

1.16 Resultados do Filtro Passivo de 3ª e 5ª ordens

Com o dimensionamento e implementação dos filtros passivos sintonizados de 3ª e 5ª ordens harmônicas na simulação, há uma alteração nas formas de onda de corrente nos sistemas abordados, desta forma as correntes tanto da fonte como da

carga são representadas pelas figuras 36 e 37, que são das subestações do CTEC e CCET respectivamente, além das correntes do neutro que são representadas pelas figuras 38 e 39 e se referem as mesmas subestações.

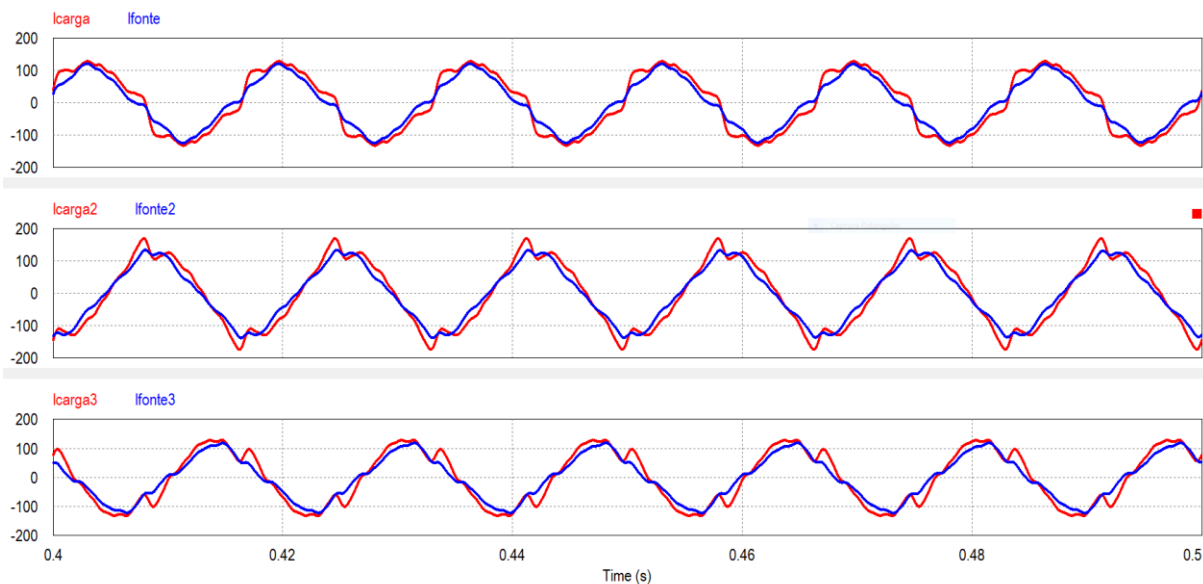


Figura 36 – Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro passivo

Fonte: Próprio Autor

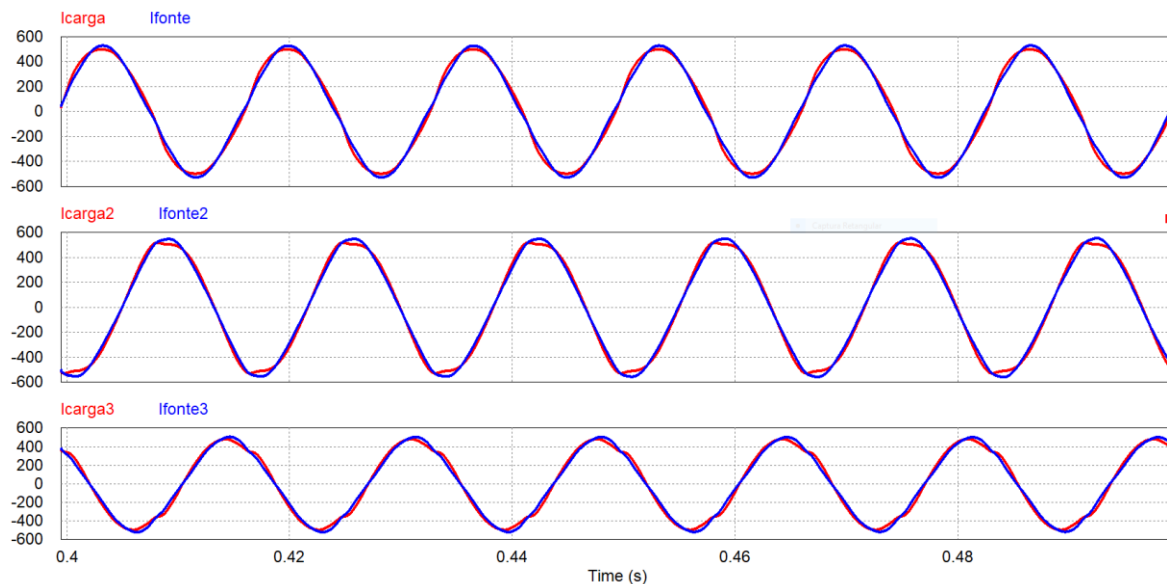


Figura 37 – Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro passivo

Fonte: Próprio Autor

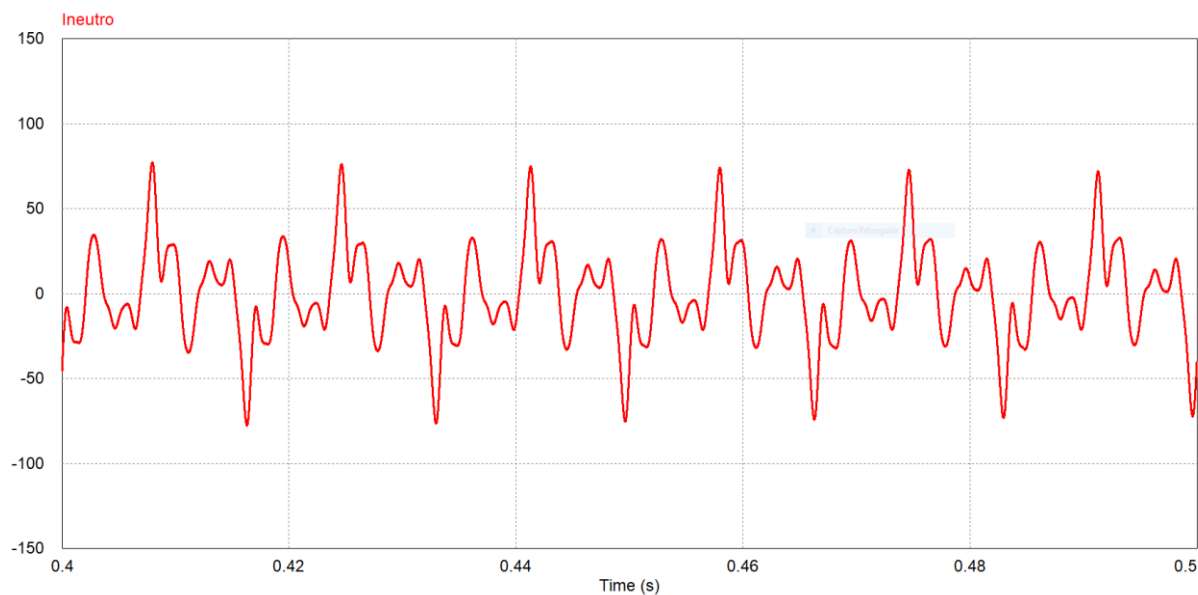


Figura 38 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro passivo

Fonte: Próprio Autor

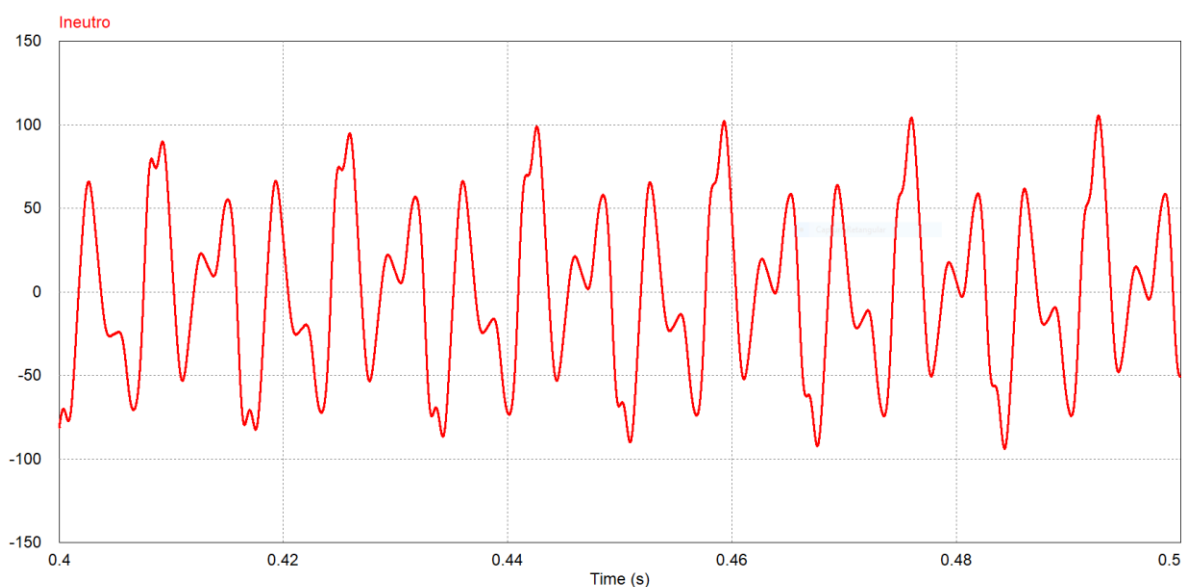


Figura 39 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro passivo

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização da mitigação harmônica foram elaborados os espectros harmônicos das figuras 36 e 37, os quais podem ser visualizados pelas figuras 40 e 41, respectivamente. Além disso, tem-se a tabela 23 que compara os valores de distorção harmônica antes e depois da implementação do filtro passivo, como também os valores de fator de potência e a corrente do neutro e a tabela 24 que

faz uma comparação dos valores das harmônicas individuais com e sem o filtro harmônico nas duas subestações abordadas.

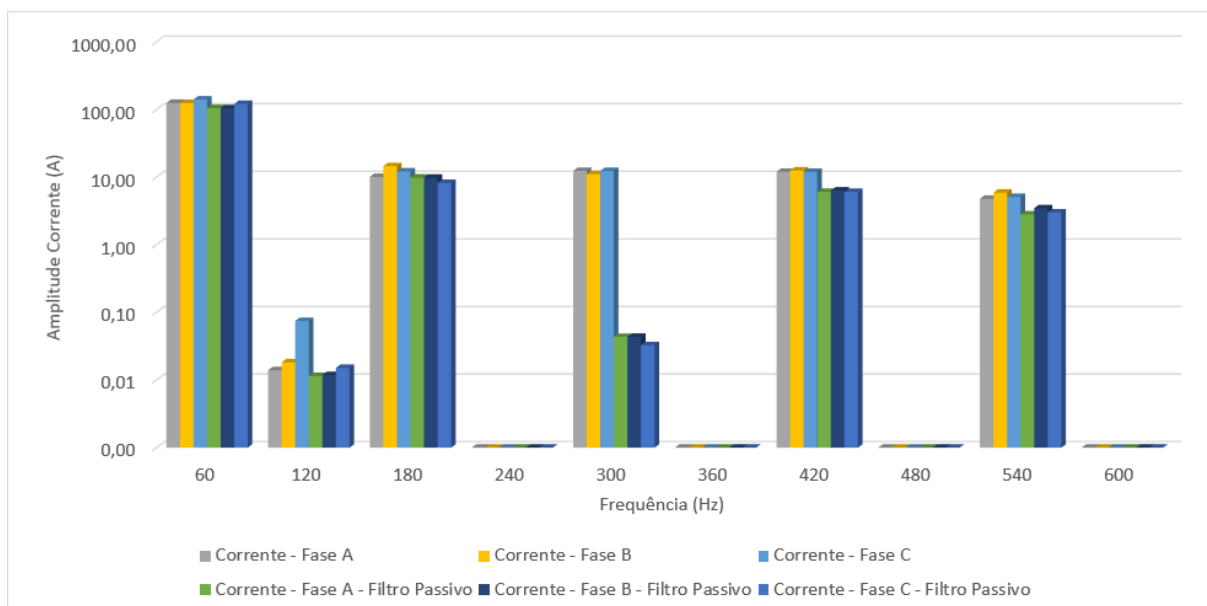


Figura 40 -Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros passivos

Fonte: Próprio Autor

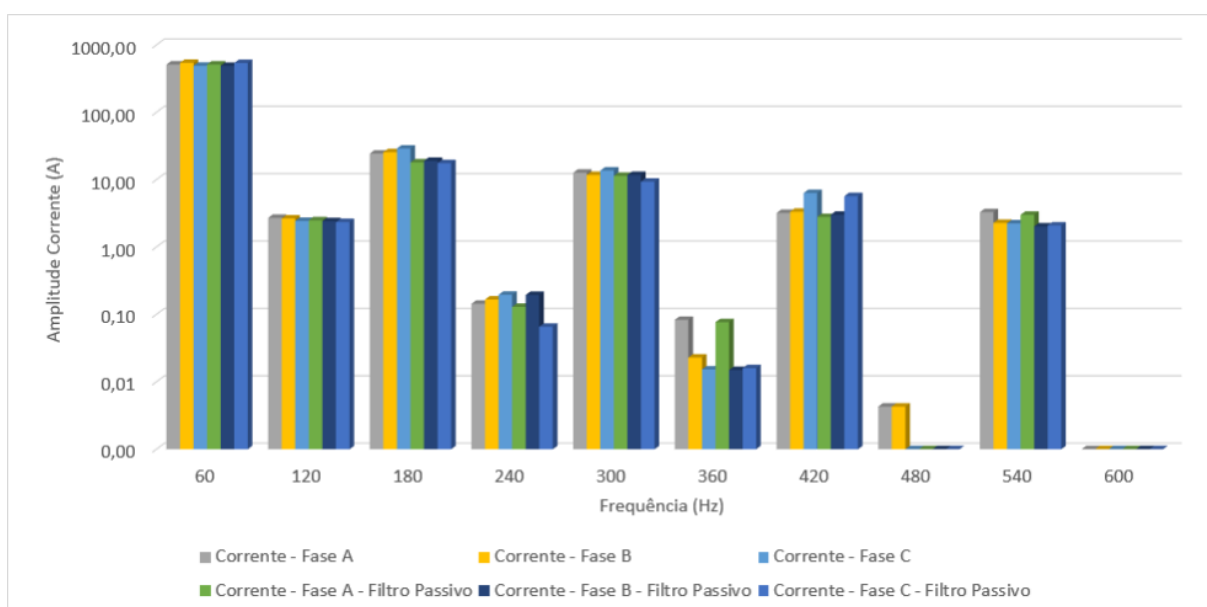


Figura 41 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros passivos

Fonte: Próprio Autor

Tabela 23 – Resultado da Implementação do filtro passivo

		CTEC		CCET	
		Sem Filtro	Filtro Passivo	Sem Filtro	Filtro Passivo
THD	Fase A	16,63%	11,23%	5,44%	3,40 %
	Fase B	18,58 %	8,76%	5,28 %	3,11 %
	Fase C	15,60%	11,50%	6,72 %	3,82 %
	Neutro (A)	48,15 Arms	26,75 Arms	64,68 Arms	48,26 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,93	0,93	0,94	0,94
	Fase B	0,92	0,93	0,96	0,96
	Fase C	0,93	0,93	0,96	0,96

Fonte: Próprio Autor

Tabela 24 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro passivo

CTEC								
	Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Sem Filtro	Ia - Arms	126,19	0,014	10,15	0	12,45	0	12,07
	Ib - Arms	125,59	0,018	14,65	0	11,17	0	12,62
	Ic - Arms	141,81	0,074	12,24	0	12,44	0	12,05
Filtro Passivo	Ia - Arms	105,68	0,011	9,91	0	0,04	0	6,09
	Ib - Arms	105,13	0,011	9,88	0	0,04	0	6,38
	Ic - Arms	121,64	0,015	8,25	0	0,03	0	6,09
CCET								
	Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Sem Filtro	Ia - Arms	514,74	2,71	24,47	0,14	12,74	0,08	3,21
	Ib - Arms	545,36	2,66	25,67	0,17	11,81	0,02	3,36
	Ic - Arms	493,21	2,44	29,08	0,20	13,69	0,02	6,36
Filtro Passivo	Ia - Arms	513,05	2,50	18,09	0,13	11,42	0,07	2,8
	Ib - Arms	491,51	2,43	19,10	0,19	11,78	0,01	3,02
	Ic - Arms	541,53	2,36	17,65	0,06	9,37	0,01	5,71

Fonte: Próprio Autor

Com os resultados obtidos, constatou-se que houve uma diminuição dos harmônicos selecionados, no caso 3º e 5º harmônicos, com maior expressão e uma diminuição de menor magnitude dos harmônicos subsequentes. Outro ponto que pode ser observado foi a diminuição da amplitude das ondas, principalmente na subestação da CTEC, ocasionado pela atuação dos filtros passivos, o que beneficia o sistema elétrico interligado ao local da medição. Ademais tem-se o aumento do fator de

potência e a diminuição da corrente do neutro, os quais são dois fatores importantes na qualidade da energia, o que comprova os benefícios da mitigação harmônica,

1.17 Resultados do filtro ativo

Para a implementação dos filtros ativos será utilizada a topologia split-capacitor com os sistemas de controle SRF e p-q, ambos sistemas de controle serão simulados nas subestações do CTEC e CCET,

1.17.1 Filtro Ativo – Método de Compensação SRF

Desta forma as correntes da fonte, do filtro e da carga tanto na subestação do CTEC como do CCET são representadas pelas Figuras 42 e 43, respectivamente, além das correntes de fase a visualização das correntes de neutro também é de extrema importância, com isso ela pode ser visualizada nas figuras 44 e 45, as quais são das subestações abordadas.

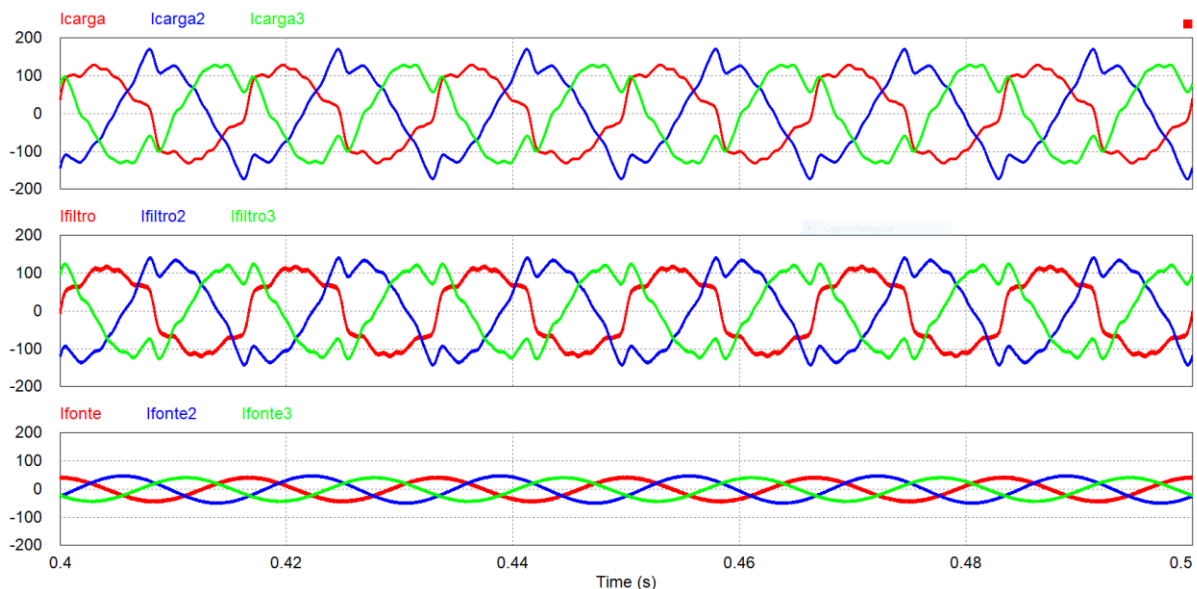


Figura 42 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro ativo SRF

Fonte: Próprio Autor

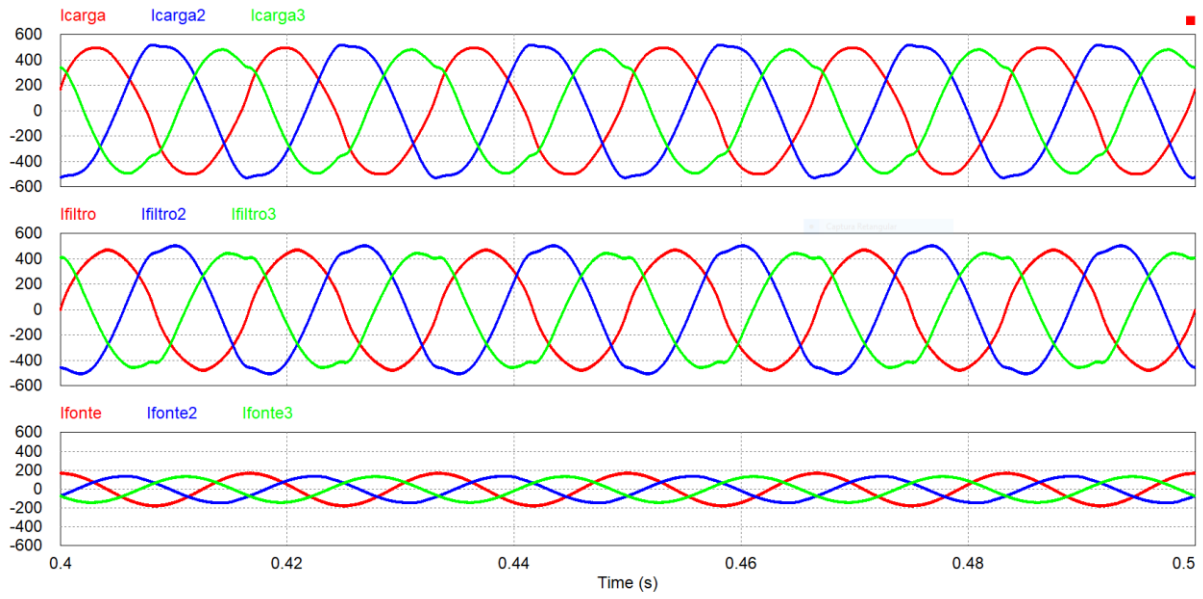


Figura 43 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro ativo SRF

Fonte: Próprio Autor

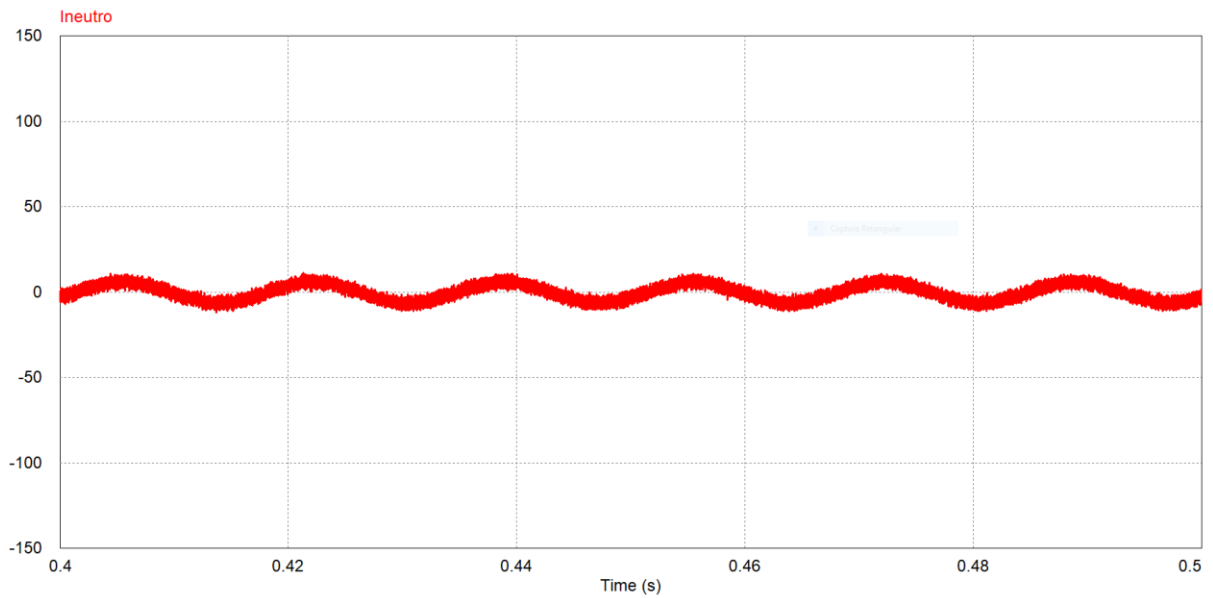


Figura 44 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Ativo SRF

Fonte: Próprio Autor

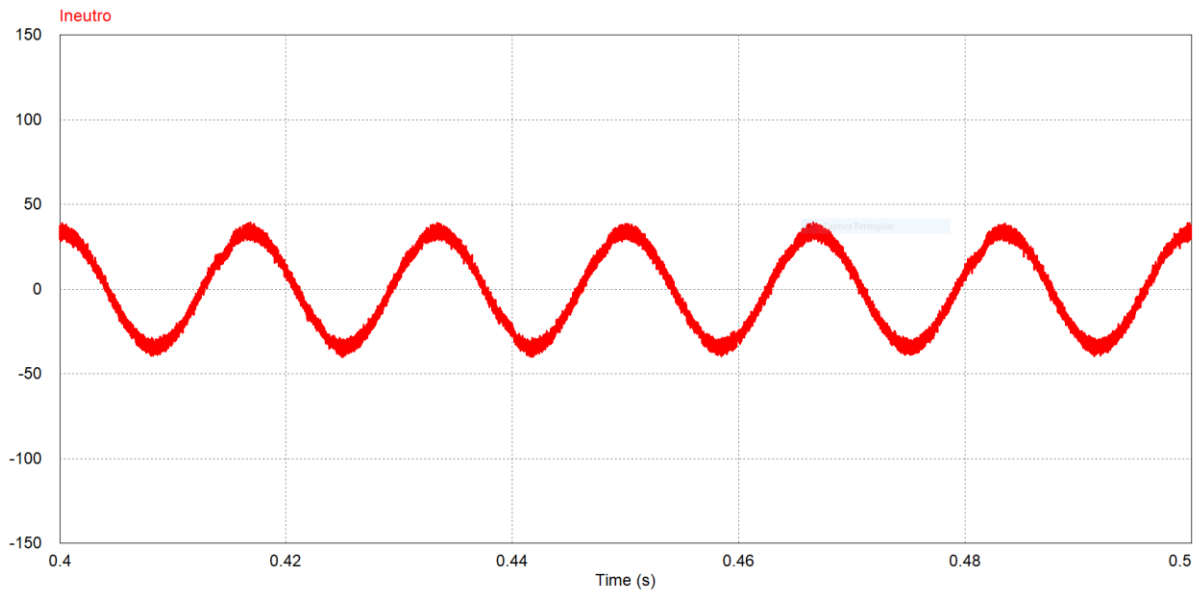


Figura 45 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Ativo SRF

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização da mitigação harmônica foram elaboradas os espectros harmônicos das figuras 46 e 47, os quais podem ser visualizados pelas figuras 42 e 43, respectivamente. Além disso, tem-se a tabela 25 que compara os valores de distorção harmônica antes e depois da implementação do filtro ativo com a compensação SRF, como também os valores de fator de potência e a corrente do neutro e a tabela 26 que faz uma comparação dos valores das harmônicas individuais com e sem o filtro ativo nas duas subestações abordadas.

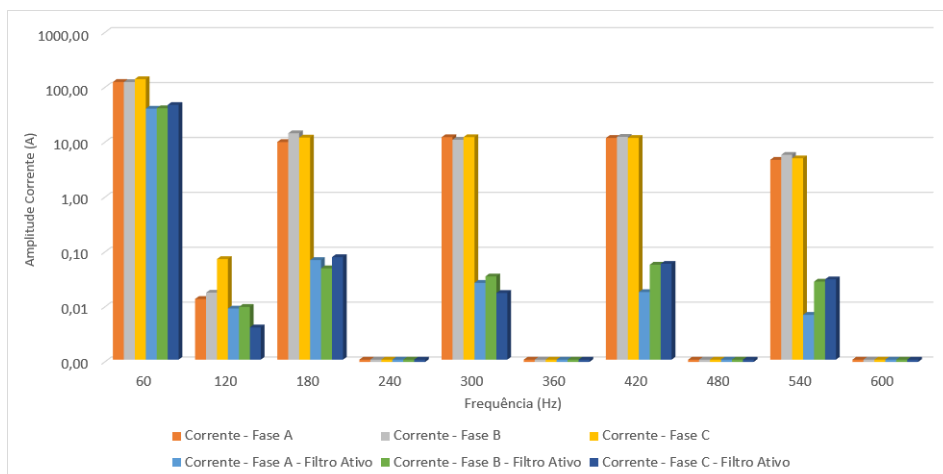


Figura 46 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros ativo SRF

Fonte: Próprio Autor

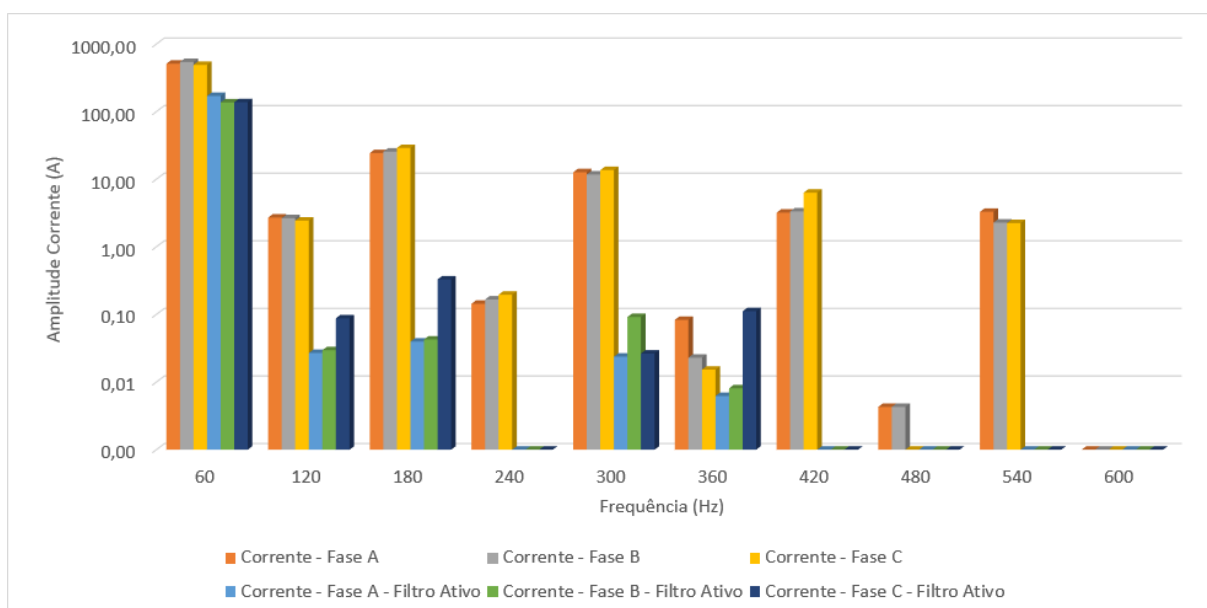


Figura 47- Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros ativo SRF

Fonte: Próprio Autor

Tabela 25 - Resultado da Implementação do filtro ativo SRF

		CTEC		CCET	
		Sem Filtro	Filtro Ativo -SRF	Sem Filtro	Filtro Ativo -SRF
THD	Fase A	16,63%	4,56%	5,44%	1,08 %
	Fase B	18,58 %	2,11%	5,28 %	0,64%
	Fase C	15,60%	1,86%	6,72 %	0,64%
	Neutro (A)	48,15 Arms	4,89 Arms	64,68 Arms	23,51 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,93	0,99	0,94	0,99
	Fase B	0,92	0,99	0,96	0,99
	Fase C	0,93	0,99	0,96	0,99

Fonte: Próprio Autor

Tabela 26 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro ativo SRF

CTEC								
	Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Sem Filtro	Ia -Arms	126,19	0,014	10,15	0	12,45	0	12,07
	Ib - Arms	125,59	0,018	14,65	0	11,17	0	12,62
	Ic - Arms	141,81	0,074	12,24	0	12,44	0	12,05
Filtro Ativo -SRF	Ia - Arms	41,15	0,01	0,07	0	0,03	0	0,02
	Ib - Arms	41,82	0,01	0,08	0	0,02	0	0,06
	Ic - Arms	48,08	0,01	0,05	0	0,04	0	0,06
CCET								
	Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Sem Filtro	Ia -Arms	514,74	2,71	24,47	0,14	12,74	0,08	3,21
	Ib - Arms	545,36	2,66	25,67	0,17	11,81	0,02	3,36
	Ic - Arms	493,21	2,44	29,08	0,20	13,69	0,02	6,36
Filtro Ativo -SRF	Ia - Arms	171,00	0,03	0,04	0	0,02	0	0
	Ib - Arms	137,26	0,02	0,05	0	0,1	0	0
	Ic - Arms	138,46	0,09	0,33	0	0,03	0,01	0

Fonte: Próprio Autor

Conforme os resultados mostrados no filtro ativo, que utiliza o método de compensação SRF, percebe-se uma redução considerável, e maior que o filtro passivo, da corrente drenada pela fonte. Outra característica é a diminuição da corrente fundamental drenada pela fonte, o que é causada pela corrente injetada pelo filtro ativo estudado. Ademais houve um equilíbrio das correntes que pode ser comprovada pela diminuição da corrente do neutro do sistema, além disso ocorreu a correção do fator de potência alcançando um valor muito próximo ao unitário.

Outro resultado que pode ser mostrado é a regulação da tensão do capacitor do inversor que se manteve estável e limiar ao degrau de referência que é de 900 V, além de pequena oscilação que ele se manteve devido a pequena circulação das componentes de sequência negativa e zero no filtro ativo (Feracin,2009), A figura 48 mostra o comportamento da tensão no capacitor com referência desejada.

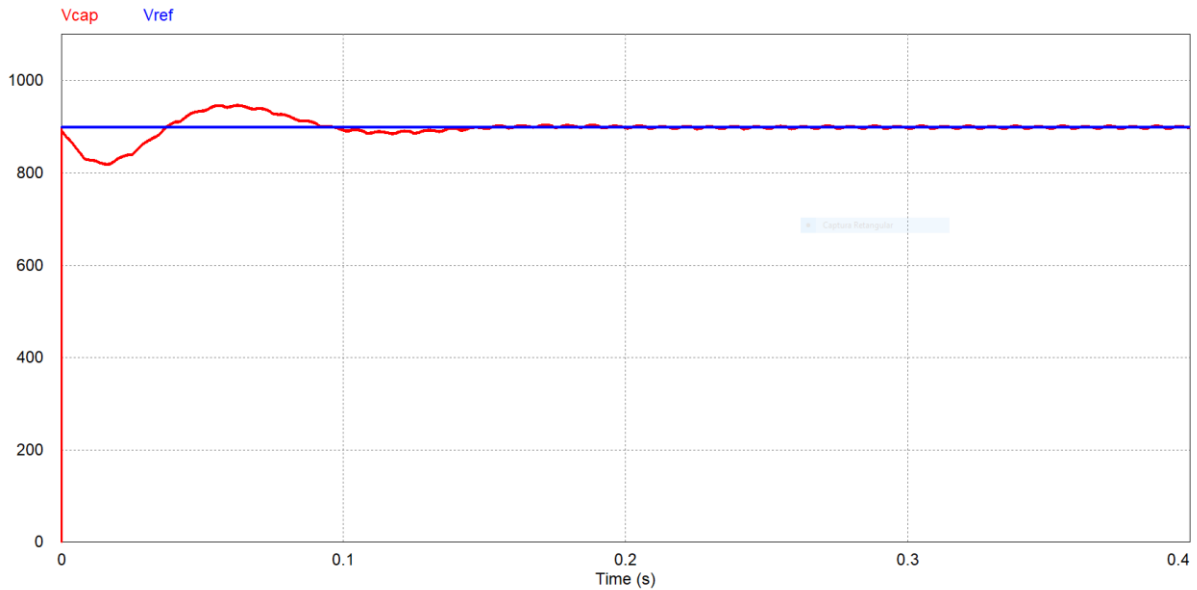


Figura 48 - Tensão no capacitor do inversor de frequência e a referência desejada

Fonte: Próprio Autor

1.17.2 Filtro Ativo – Método de Compensação p-q

Neste subitem são mostrados os resultados da simulação do filtro ativo de potência usando o método de compensação p-q. Desta forma as figuras 49 e 50 ilustram as formas de onda das correntes na carga, no filtro e na fonte tanto na subestação do CTEC como do CCET, respectivamente. Além disso tem-se as correntes do neutro dessas localidades que são representadas pelas figuras 51 e 52, o qual demonstrará um melhor equilíbrio nas correntes do sistema.

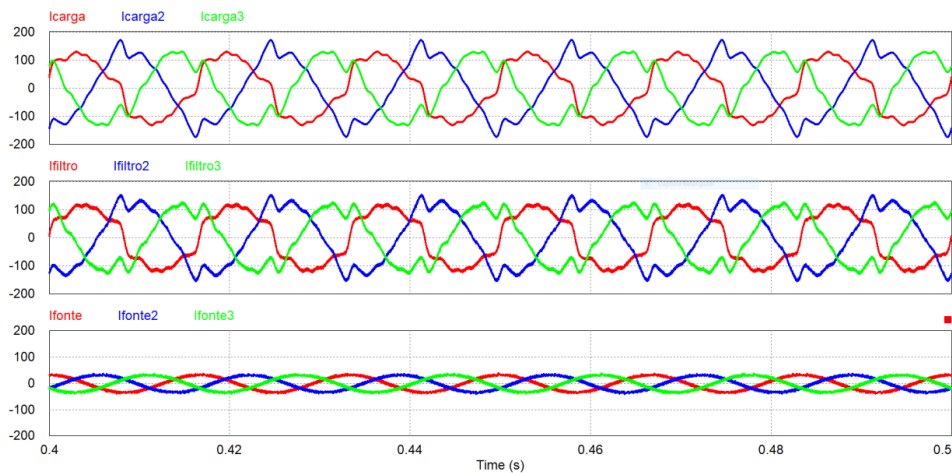


Figura 49 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro ativo p-q

Fonte: Próprio Autor

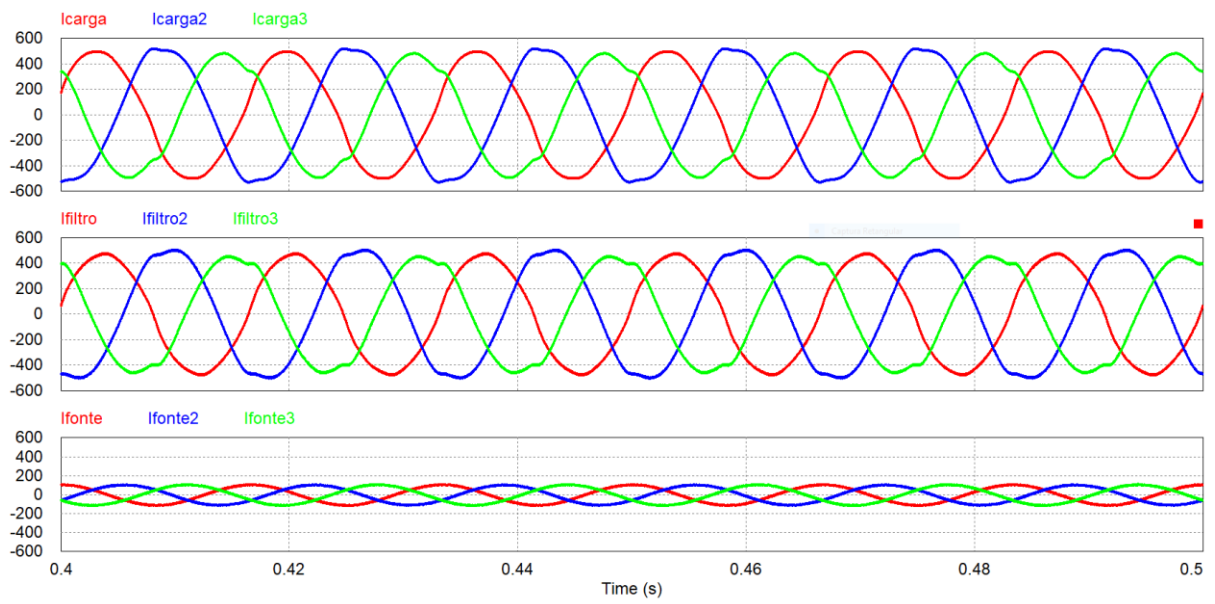


Figura 50 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro ativo p-q

Fonte: Próprio Autor

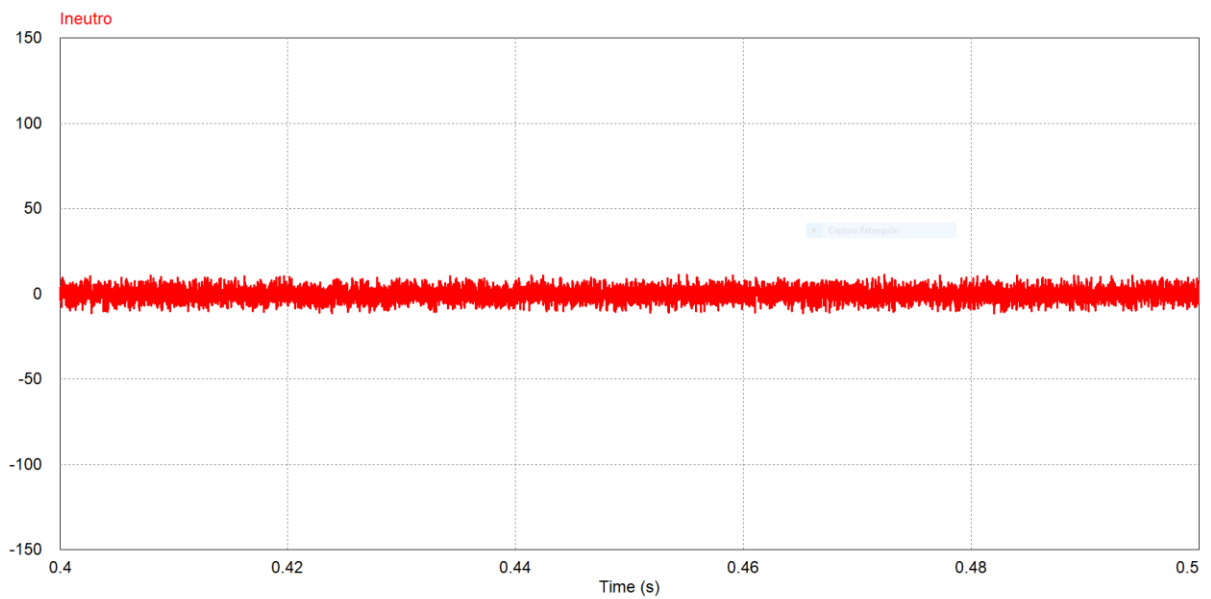


Figura 51 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Ativo p-q

Fonte: Próprio Autor

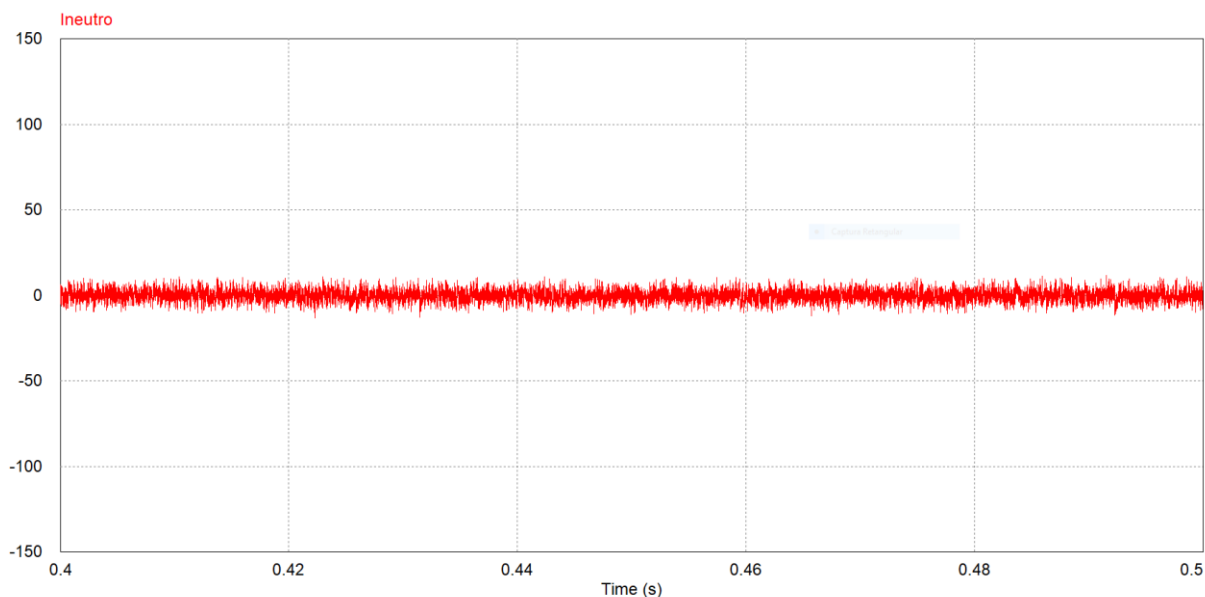


Figura 52 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Ativo p-q

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização da mitigação harmônica foram elaborados os espectros harmônicos das figuras 49 e 50, os quais podem ser visualizados pelas figuras 53 e 54, respectivamente. Além disso, tem-se a tabela 27 que compara os valores de distorção harmônica antes e depois da implementação do filtro ativo com a compensação p-q, como também os valores de fator de potência e a corrente do neutro e a tabela 28 que faz uma comparação dos valores das harmônicas individuais com e sem o filtro ativo nas duas subestações abordadas.

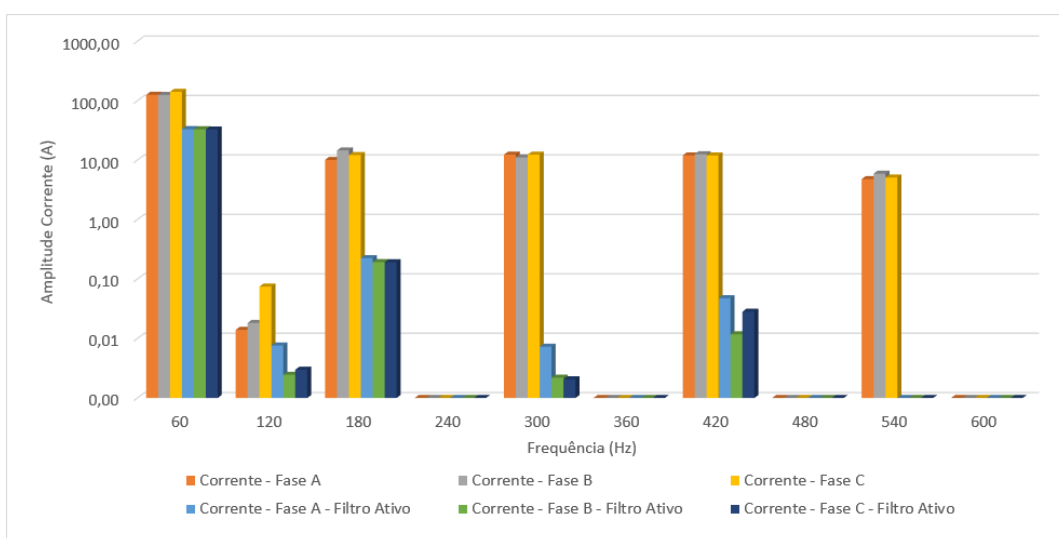


Figura 53 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros ativo p-q

Fonte: Próprio Autor

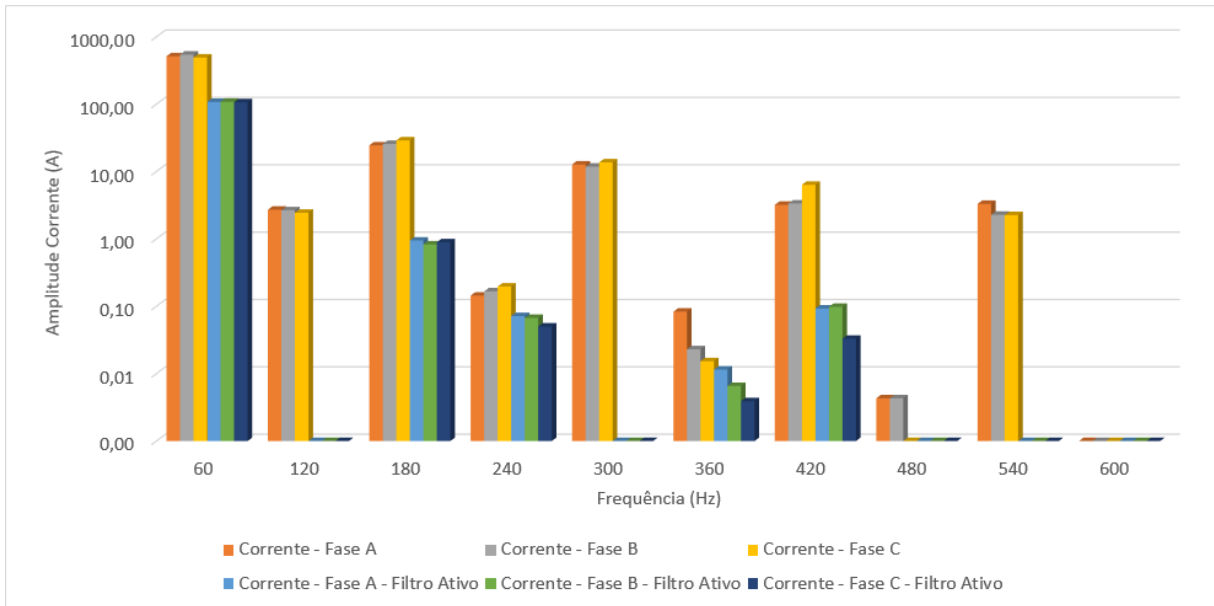


Figura 54 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros ativo p-q

Fonte: Próprio Autor

Tabela 27 - Resultado da Implementação do filtro ativo p-q

		CTEC		CCET	
		Sem Filtro	Filtro Ativo -p-q	Sem Filtro	Filtro Ativo -p-q
THD	Fase A	16,63%	7,80%	5,44%	2,62%
	Fase B	18,58 %	7,87%	5,28 %	2,54%
	Fase C	15,60%	7,78%	6,72 %	2,56%
	Neutro (A)	48,15 Arms	3,37 Arms	64,68 Arms	3,37 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,93	0,99	0,94	0,99
	Fase B	0,92	0,99	0,96	0,99
	Fase C	0,93	0,99	0,96	0,99

Fonte: Próprio Autor

Tabela 28 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro ativo p-q

CTEC								
	Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Sem Filtro	la -Arms	126,19	0,014	10,15	0	12,45	0	12,07
	lb - Arms	125,59	0,018	14,65	0	11,17	0	12,62
	lc - Arms	141,81	0,074	12,24	0	12,44	0	12,05
Filtro Ativo -p-q	la - Arms	33,40	0,007	0,22	0	0,07	0	0,05
	lb - Arms	33,17	0,002	0,19	0	0,02	0	0,01
	lc - Arms	32,98	0,003	0,19	0	0,02	0	0,02
CCET								
	Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Sem Filtro	la -Arms	514,74	2,71	24,47	0,14	12,74	0,08	3,21
	lb - Arms	545,36	2,66	25,67	0,17	11,81	0,02	3,36
	lc - Arms	493,21	2,44	29,08	0,20	13,69	0,02	6,36
Filtro Ativo -p-q	la - Arms	107,93	0	0,95	0	0,012	0,01	0,1
	lb - Arms	108,44	0	0,83	0	0,010	0,01	0,1
	lc - Arms	106,69	0	0,90	0	0,050	0,01	0,033

Fonte: Próprio Autor

Conforme os resultados mostrados no filtro ativo que utiliza o método de compensação p-q, percebe-se uma redução considerável das harmônicas presentes, maior que o filtro passivo, na corrente drenada pela fonte, porém não tão eficiente quanto o filtro ativo que utiliza o método de compensação SRF, em que teve-se resultados melhores com relação a mitigação harmônica.

Outra característica é a diminuição da corrente fundamental drenada pela fonte, onde neste caso teve-se uma diminuição maior que no filtro ativo SRF, fazendo com que a corrente que é injetada pelo filtro ativo p-q seja maior que a do filtro SRF, e acaba resultando numa menor injeção de potência por parte do sistema, Ademais houve um maior equilíbrio das correntes que pode ser comprovada pelo menor valor da corrente do neutro do sistema quando comparado com o filtro passivo e o outro tipo de filtro ativo, além disso ocorreu a correção do fator de potência alcançando um valor muito próximo ao unitário.

Já com relação a tensão do capacitor ela teve um comportamento igual ao descrito pela figura 49, mantendo as características do filtro ativo SRF.

1.18 Resultados do Filtro Híbrido

Para a implementação dos filtros híbridos será utilizada um filtro ativo com a topologia split-capacitor com os sistemas de controle SRF e p-q, ambos sistemas de controle serão simulados nas subestações do CTEC e CCET, e os filtros passivos de 3ª e 5ª ordens foram dimensionados conforme a mitigação ocorrida no filtro ativo.

1.18.1 Filtro Híbrido – Método de Compensação SRF

Com base na simulação que foi realizada, as correntes da fonte, do filtro e da carga tanto na subestação do CTEC como do CCET são representadas pelas Figuras 55 e 56, respectivamente, além das correntes de fase, a visualização das correntes de neutro também é de extrema importância, com isso ela pode ser visualizada nas figuras 57 e 58, as quais são das subestações abordadas.

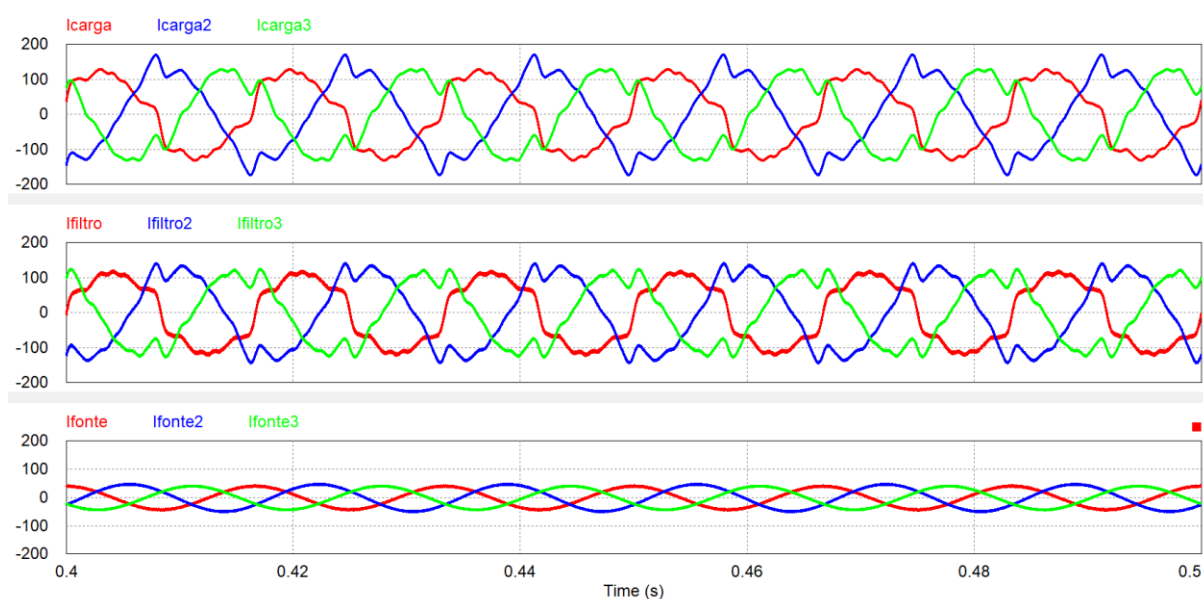


Figura 55 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro híbrido SRF

Fonte: Próprio Autor

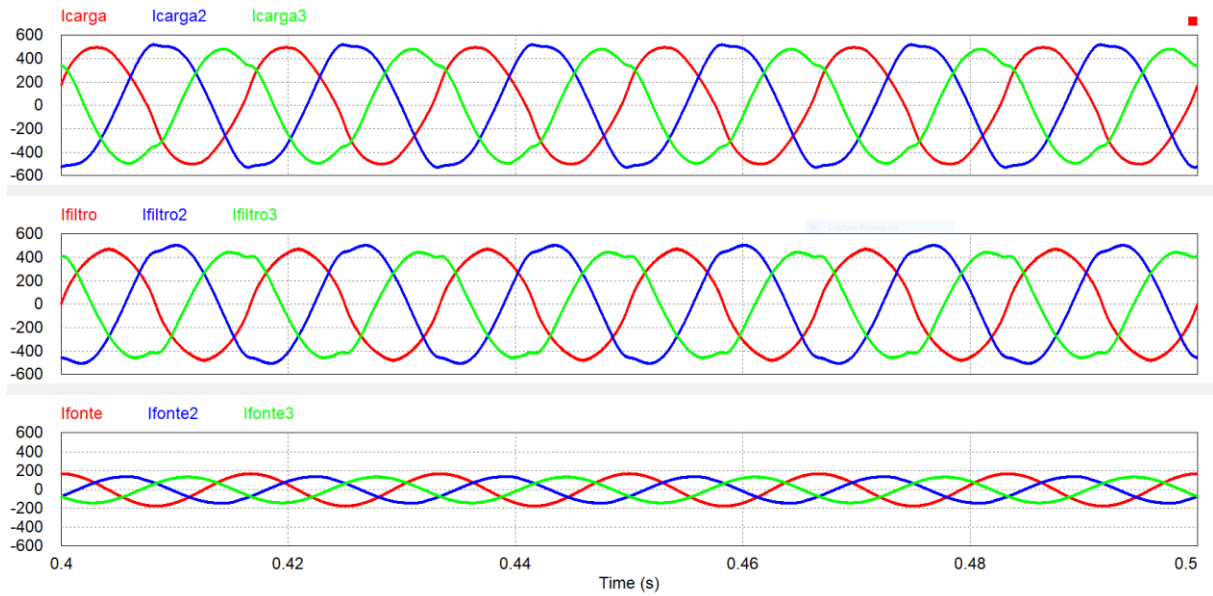


Figura 56 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCET com filtro híbrido SRF

Fonte: Próprio Autor

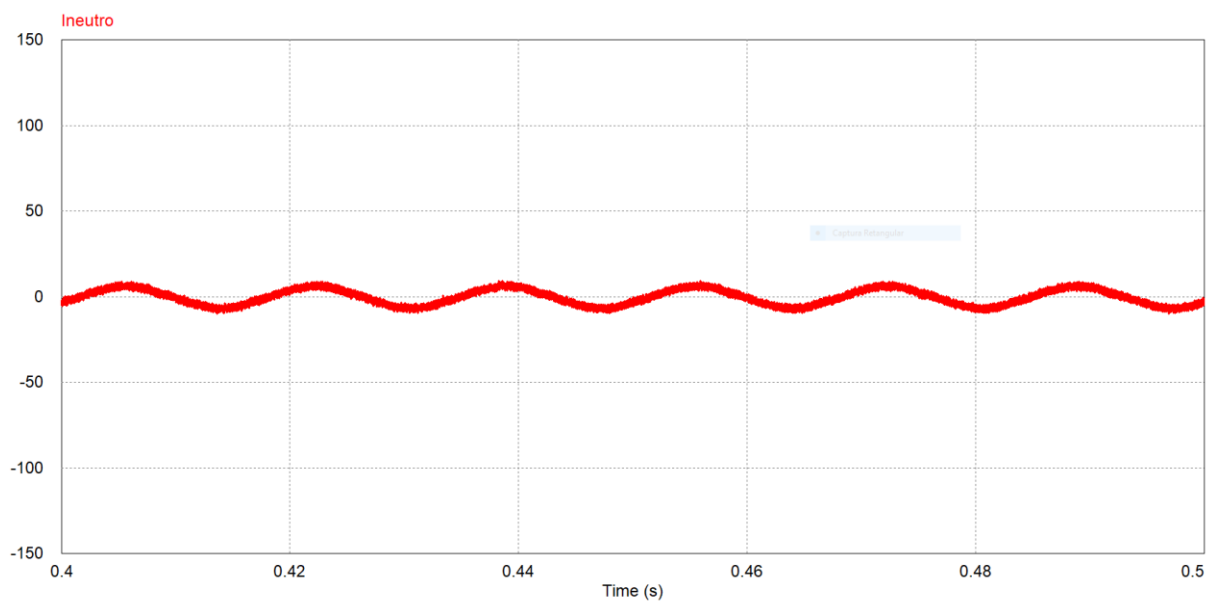


Figura 57 - Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Híbrido SRF

Fonte: Próprio Autor

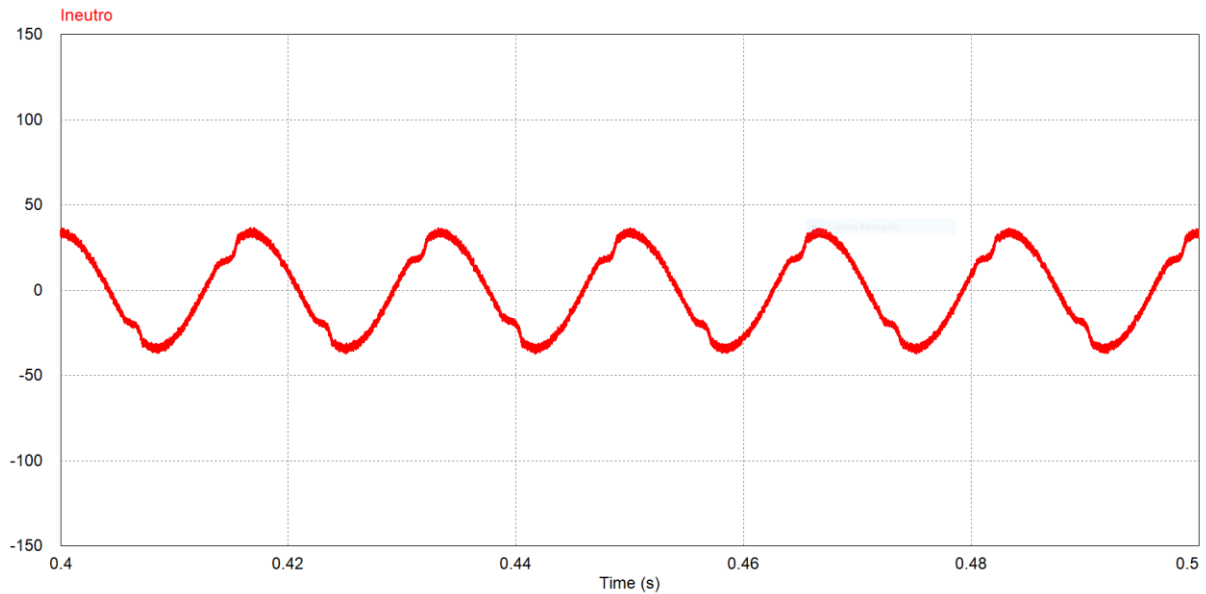


Figura 58 - Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Híbrido SRF

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização da mitigação harmônica foram elaboradas os espectros harmônicos das figuras 55 e 56, os quais podem ser visualizados pelas figuras 59 e 60, respectivamente. Além disso, tem-se a tabela 29 que compara os valores de distorção harmônica antes e depois da implementação do filtro híbrido com a compensação SRF, como também os valores de fator de potência e a corrente do neutro e a tabela 30 que faz uma comparação dos valores das harmônicas individuais com e sem o filtro ativo nas duas subestações abordadas.

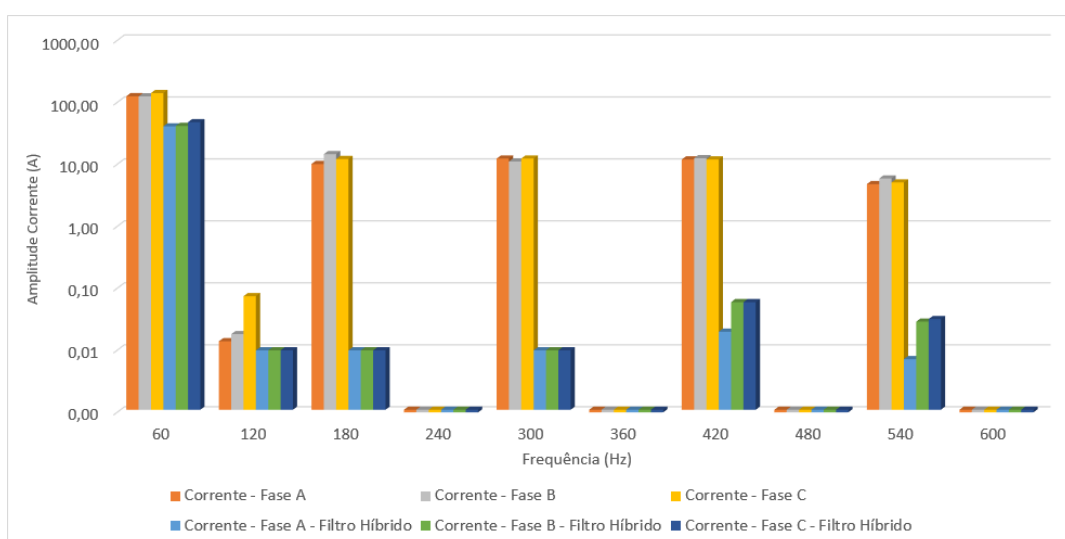


Figura 59 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros híbrido SRF

Fonte: Próprio Autor

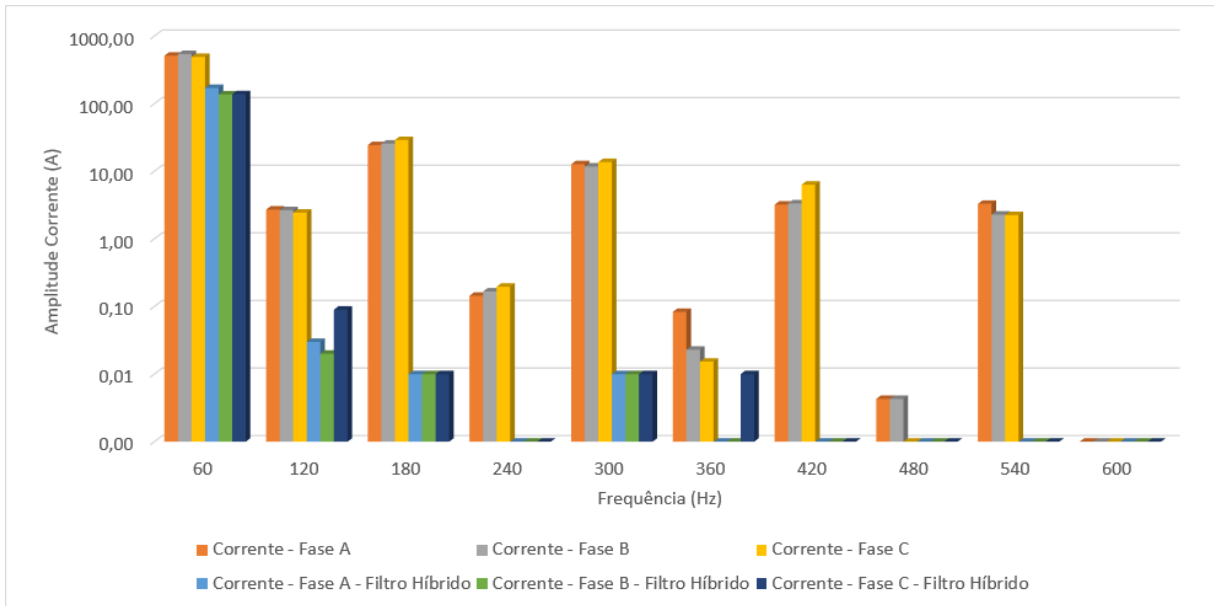


Figura 60 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros híbrido SRF

Fonte: Próprio Autor

Tabela 29 - Resultado da Implementação do filtro híbrido SRF

		CTEC		CCET	
		Sem Filtro	Filtro Híbrido -SRF	Sem Filtro	Filtro Híbrido -SRF
THD	Fase A	16,63%	1,66%	5,44%	0,53%
	Fase B	18,58 %	1,00%	5,28 %	0,43%
	Fase C	15,60%	1,17%	6,72 %	0,17%
	Neutro (A)	48,15 Arms	4,64 Arms	64,68 Arms	22,95 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,935	0,99	0,941	0,99
	Fase B	0,928	0,99	0,960	0,99
	Fase C	0,931	0,99	0,963	0,99

Fonte: Próprio Autor

Tabela 30 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro híbrido SRF

CTEC								
	Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Sem Filtro	Ia - Arms	126,19	0,014	10,15	0	12,45	0	12,07
	Ib - Arms	125,59	0,018	14,65	0	11,17	0	12,62
	Ic - Arms	141,81	0,074	12,24	0	12,44	0	12,05
Filtro híbrido - SRF	Ia - Arms	41,15	0,01	0,01	0	0,01	0	0,02
	Ib - Arms	41,82	0,01	0,01	0	0,01	0	0,06
	Ic - Arms	48,08	0,01	0,01	0	0,01	0	0,06
CCET								
	Ordem	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a
Sem Filtro	Ia - Arms	514,74	2,71	24,47	0,14	12,74	0,08	3,21
	Ib - Arms	545,36	2,66	25,67	0,17	11,81	0,02	3,36
	Ic - Arms	493,21	2,44	29,08	0,20	13,69	0,02	6,36
Filtro híbrido - SRF	Ia - Arms	171,00	0,03	0,01	0	0,01	0	0
	Ib - Arms	137,26	0,02	0,01	0	0,01	0	0
	Ic - Arms	138,46	0,09	0,01	0	0,01	0,01	0

Fonte: Próprio Autor

Conforme os resultados apresentados no filtro híbrido que utiliza o método de compensação SRF, percebe-se uma redução considerável, e maior que o filtro ativo e passivo, da corrente drenada pela fonte. Outra característica é a corrente fundamental que se manteve com o mesmo valor da fundamental do filtro ativo, sendo reduzido apenas as correntes 3^a e 5^a ordens as quais foram mitigadas pelos filtros passivos do filtro híbrido. Ademais houve um equilíbrio das correntes maior que nos outros dois filtros, sendo comprovada pelo menor valor da corrente do neutro.

1.18.2 Filtro Híbrido – Método de Compensação p-q

Com base na simulação que foi realizada, as correntes da fonte, da carga e do filtro ativo tanto na subestação do CTEC como do CCET são representadas Figuras pelas 61 e 62, respectivamente, além das correntes de fase a visualização das correntes de neutro também é de extrema importância, sendo visualizada nas figuras 63 e 64, as quais são das subestações abordadas.

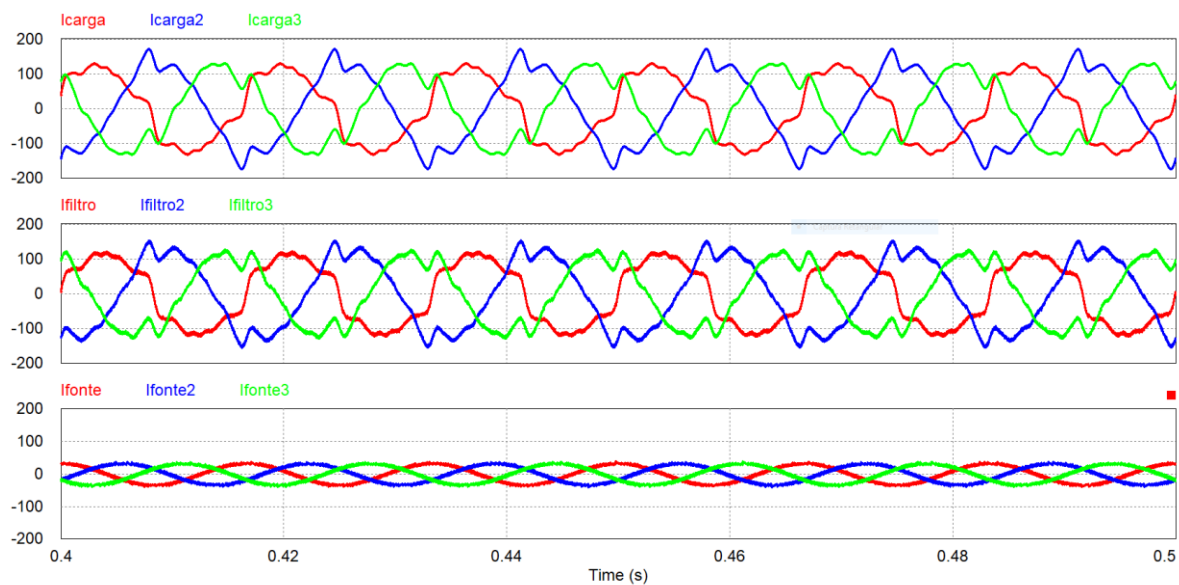


Figura 61 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CTEC com filtro híbrido p-q

Fonte: Próprio Autor

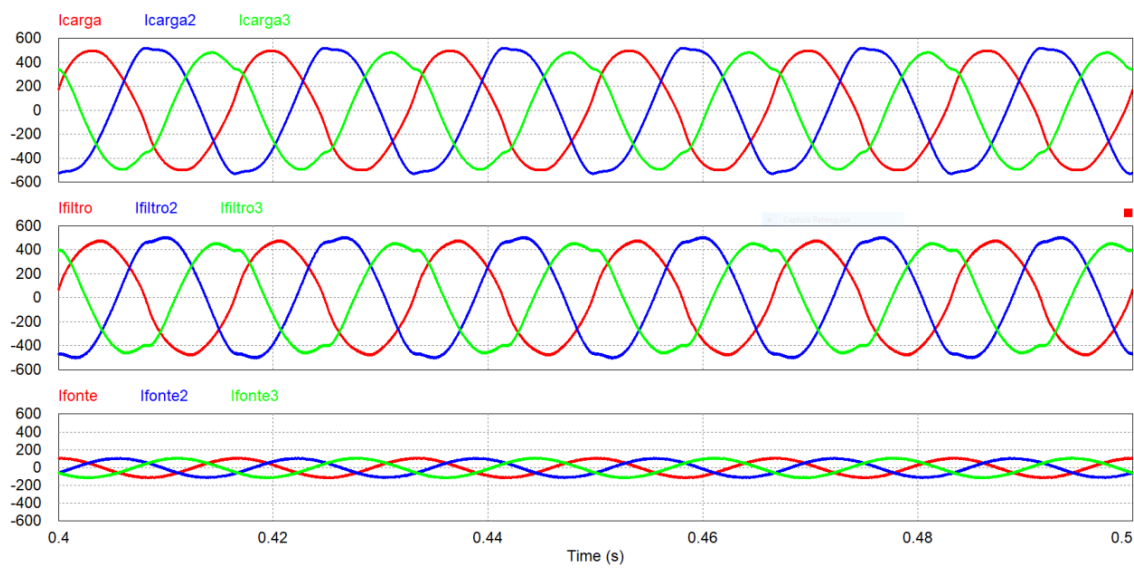


Figura 62 - Correntes das fases A, B e C na subestação da CCEt com filtro híbrido p-q

Fonte: Próprio Autor

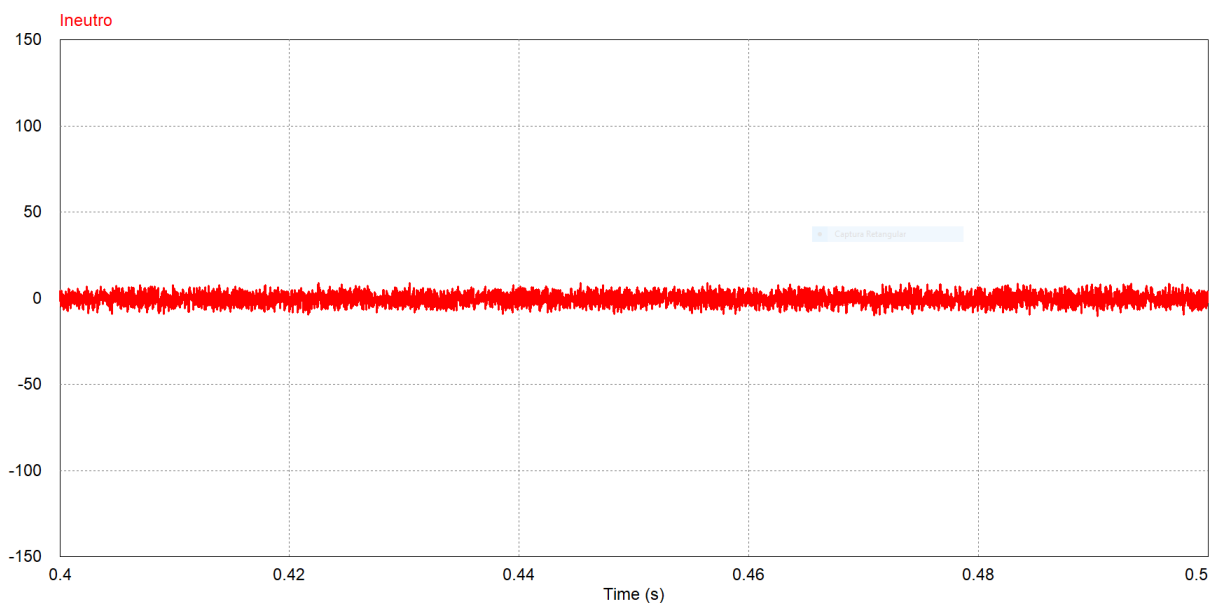


Figura 63 – Corrente do Neutro na Subestação do CTEC com filtro Híbrido p-q

Fonte: Próprio Autor

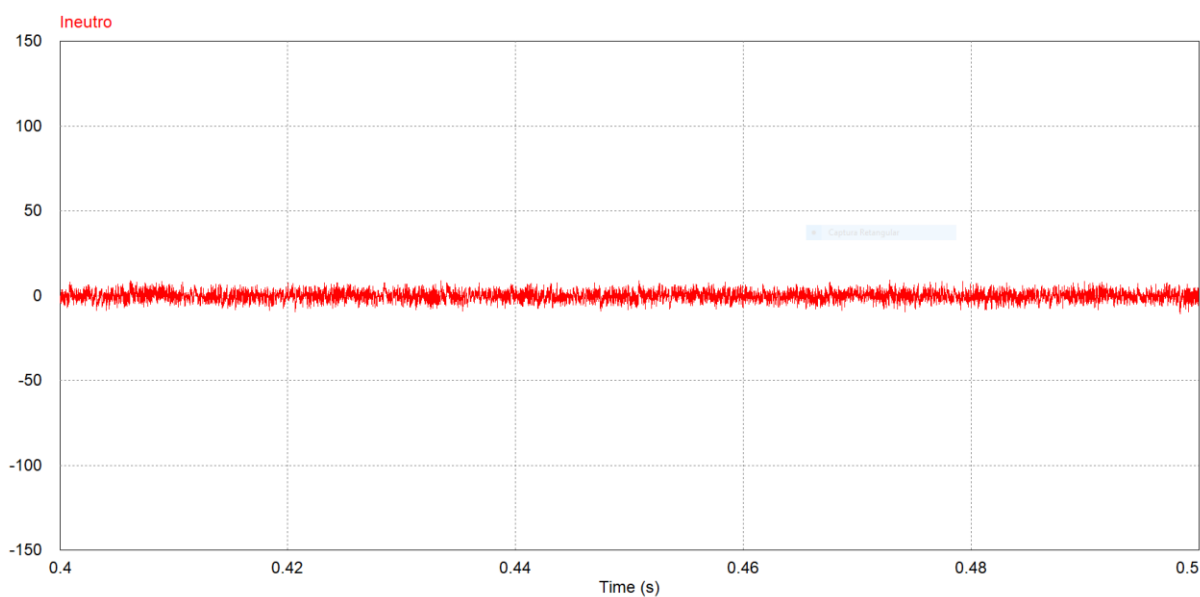


Figura 64 – Corrente do Neutro na Subestação do CCET com filtro Híbrido p-q

Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor visualização da mitigação harmônica foram elaboradas os espectros harmônicos das figuras 61 e 62, os quais podem ser visualizados pelas figuras 65 e 66, respectivamente. Além disso, tem-se a tabela 31 que compara os valores de distorção harmônica antes e depois da implementação do filtro híbrido com

a compensação p-q, como também os valores de fator de potência e a corrente do neutro e a tabela 32 que faz uma comparação dos valores das harmônicas individuais com e sem o filtro ativo nas duas subestações abordadas.

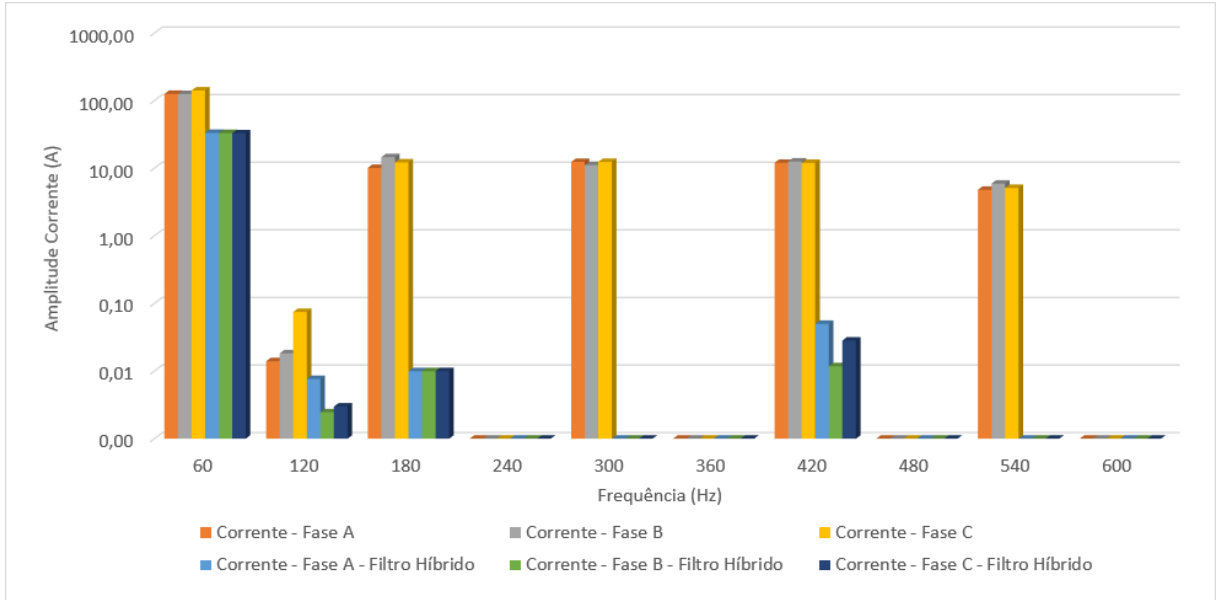


Figura 65 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CTEC com filtros híbrido p-q

Fonte: Próprio Autor

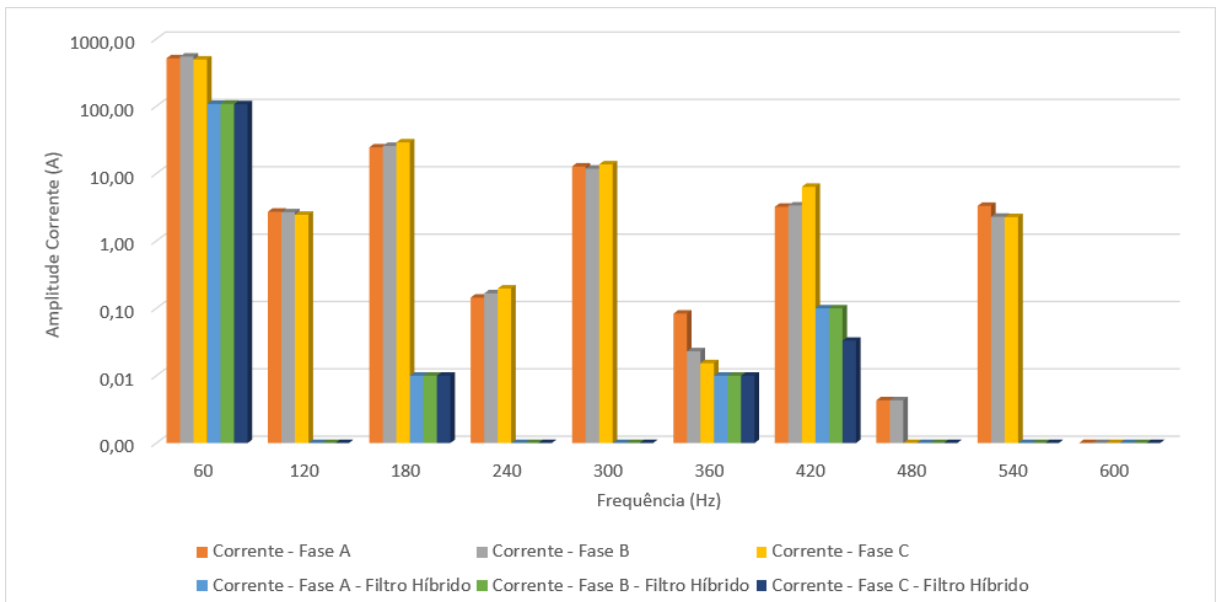


Figura 66 - Espectro de frequência da corrente na subestação do CCET com filtros híbrido p-q

Fonte: Próprio Autor

Tabela 31 - Resultado da Implementação do filtro híbrido p-q

		CTEC		CCET	
		Sem Filtro	Filtro Híbrido -p-q	Sem Filtro	Filtro Híbrido -p-q
THD	Fase A	16,63%	6,37%	5,44%	2,05%
	Fase B	18,58 %	6,05%	5,28 %	1,99%
	Fase C	15,60%	5,92%	6,72 %	1,88%
	Neutro (A)	48,15 Arms	2,80 Arms	64,68 Arms	2,81 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,935	0,99	0,941	0,99
	Fase B	0,928	0,99	0,960	0,99
	Fase C	0,931	0,99	0,963	0,99

Fonte: Próprio Autor

Tabela 32 - Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação ao filtro híbrido p-q

CTEC								
	Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Sem Filtro	Ia -Arms	126,19	0,014	10,15	0	12,45	0	12,07
	Ib - Arms	125,59	0,018	14,65	0	11,17	0	12,62
	Ic - Arms	141,81	0,074	12,24	0	12,44	0	12,05
Filtro Ativo -p-q	Ia - Arms	33,40	0,007	0,01	0	0,01	0	0,05
	Ib - Arms	33,17	0,002	0,01	0	0,01	0	0,01
	Ic - Arms	32,98	0,003	0,01	0	0,01	0	0,02
CCET								
	Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Sem Filtro	Ia -Arms	514,74	2,71	24,47	0,14	12,74	0,08	3,21
	Ib - Arms	545,36	2,66	25,67	0,17	11,81	0,02	3,36
	Ic - Arms	493,21	2,44	29,08	0,20	13,69	0,02	6,36
Filtro Ativo -p-q	Ia - Arms	107,93	0	0,01	0	0,01	0,01	0,1
	Ib - Arms	108,44	0	0,01	0	0,01	0,01	0,1
	Ic - Arms	106,69	0	0,01	0	0,01	0,01	0,033

Fonte: Próprio Autor

1.19 Análise comparativa entre os Filtros apresentados

Os três tipos de filtros harmônicos são os principais utilizados na mitigação harmônica, dentre elas o filtro passivo é o mais simplório, e o filtro ativo e híbrido os mais sofisticados. No caso do filtro ativo e híbrido eles utilizam neste trabalho o método de compensação SRF e p-q, as quais são amplamente utilizadas nestas aplicações. Já a topologia do filtro ativo utilizada é split-capacitor que é apropriado para baixas e médias potências, que é o exemplo do caso estudado, cujo local são as subestações do CTEC e CCET da UFRN.

Observando as simulações foi possível perceber que os filtros estudados tiveram comportamento satisfatório no que diz respeito à compensação das correntes de carga. Com o filtro passivo obteve-se uma redução significativa dos índices de distorção harmônica, porém com o filtro ativo e híbrido p-q e SRF foi obtido uma redução ainda maior, com o filtro ativo e híbrido SRF obtendo melhores resultados quando comparado com o p-q. Obtendo-se, assim, a diminuição das distorções harmônicas, as quais passaram a estar dentro dos limites estabelecidos nas normas abordadas no trabalho, o que pode ser constatado pelas tabelas 33 e 34 que comparam os resultados coletados das simulações feitas.

Porém, com relação a corrente do neutro, que determina se o sistema está balanceado ou não, o filtro ativo p-q obteve melhores resultados, conseguindo desta forma um valor menor da corrente do neutro, isso por causa da utilização da corrente de sequência zero no processo de compensação, mais precisamente, na transformada de alfa/beta para abc, com isso acaba tendo melhores resultados por causa da corrente de sequência zero estar vinculada diretamente a corrente do neutro do sistema.

Com referência a tensão do sistema e ao fator de potência todos tiveram resultados parecidos, a tensão se manteve com o mesmo formato das figuras 29 e 31 e o fator de potência, para os filtros ativos e híbridos, se manteve próximo do unitário o que seria ideal para qualquer sistema.

Já a tensão do capacitor teve o mesmo comportamento em todos os filtros ativos e híbridos, apresentando uma certa ondulação, causada pela circulação das

harmônicas negativa e zero, ocasionada pela corrente do neutro que necessariamente circula pelo filtro através do ponto central entre os dois capacitores.

Tabela 33 – Tabela de comparação entre os resultados coletados na simulação da subestação do CTEC

		CTEC					
				Ativo		Híbrido	
		Sem Filtro	Passivo	SRF	p-q	SRF	p-q
THD	Fase A	16,63%	11,23%	4,56%	7,80%	1,66%	6,37%
	Fase B	18,58 %	8,76%	2,11%	7,87%	1,00%	6,05%
	Fase C	15,60%	11,50%	1,86%	7,78%	1,17%	5,92%
	Neutro (A)	48,15 Arms	26,75 Arms	4,89 Arms	3,37 Arms	4,64 Arms	2,80 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,935	0,93	0,99	0,99	0,99	0,99
	Fase B	0,928	0,93	0,99	0,99	0,99	0,99
	Fase C	0,931	0,93	0,99	0,99	0,99	0,99

Fonte: Próprio Autor

Tabela 34 - Tabela de comparação entre os resultados coletados na simulação da subestação do CCET

		CCET					
				Ativo		Híbrido	
		Sem Filtro	Passivo	SRF	p-q	SRF	p-q
THD	Fase A	5,44%	3,40 %	1,08 %	2,62%	0,53%	2,05%
	Fase B	5,28 %	3,11 %	0,64%	2,54%	0,43%	1,99%
	Fase C	6,72 %	3,82 %	0,64%	2,56%	0,17%	1,88%
	Neutro (A)	64,68 Arms	48,26 Arms	23,51 Arms	3,37 Arms	22,95 Arms	2,81 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,941	0,94	0,99	0,99	0,99	0,99
	Fase B	0,960	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99
	Fase C	0,963	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99

Fonte: Próprio Autor

Capítulo 6

CONCLUSÃO

1.20 Estudos realizados e conclusões

Nesta dissertação a compensação de harmônicos por meio dos filtros passivo, ativos e híbridos trifásicos em duas subestações do UFRN foi apresentada. Por todo o capítulo 2 foram apresentados os conceitos de harmônicos, juntamente com as normas que as cercam e os tipos de filtros utilizados para a mitigação deles.

Já no capítulo 3 foram apresentados os métodos de compensação ativa de potência p-q, o método SRF e a metodologia para o cálculo dos ganhos do compensador dinâmico PI que faz parte do circuito, este último no apêndice A.

Foi também realizado um estudo dos sistemas que fizeram parte do estudo, no caso as subestações do CTEC e do CCET, permitindo caracterizar melhor os equipamentos utilizados na medição e o sistema que foi trabalhado na simulação, Além disso os modelos de malha de tensão e corrente foram apresentados, os quais foram utilizados nos cálculos dos ganhos dos controladores, e foi apresentada uma metodologia para o dimensionamento do capacitor do barramento CC.

Por último foram apresentadas as simulações digitais com os filtros estudados, os métodos de compensação e os sistemas abordados que permitiram uma comparação entre todas as topologias apresentadas, Nas simulações os filtros tiveram um resultado satisfatório, com algumas peculiaridades, dentre elas um método de compensação no caso o SRF teve um melhor desempenho na mitigação harmônica do que o método p-q, porém em relação ao desequilíbrio das correntes o método p-q teve uma pequena vantagem, Já com os filtros passivos apenas houve uma melhora da distorção harmônica, o que foi suficiente para o caso estudado e os filtros híbridos tiveram comportamento similar aos filtros ativos só que com resultados um pouco melhores na filtragem dos harmônicos.

Para o fator de potência, ele foi corrigido em todos os casos dos filtros ativos e híbridos, e houve uma pequena melhora com os filtros passivos, o que não foi comprometedor, já que todos os índices estavam dentro do permitido. Já com a corrente do neutro houve uma diminuição com os filtros passivos, mas apenas com os filtros ativos e híbridos ela foi bastante atenuada, o que relata um melhor equilíbrio das correntes e um menor índice de distorção harmônica nas correntes das fases.

Com relação aos sistemas abordados, eles não tiveram influência sobre o resultado, a principal intenção além de comparar os resultados era de constatar a eficácia dos filtros projetados, o que neste caso foi comprovado, todos os filtros funcionaram satisfatoriamente em ambos os sistemas, sendo para uma futura implementação na UFRN o filtro ativo, de ambos os métodos abordados, é o mais indicado, pois diminuiu satisfatoriamente os índices de distorção harmônica e melhorou os principais índices de qualidade de energia, além de ter o melhor custo benefício das formas de mitigação abordadas no trabalho .

Desta forma pôde-se comprovar em uma análise prática, com a ajuda do software PSIM®, que os filtros estudados têm como objetivo principal deixar o sistema simulado dentro das normas de distorção harmônica e acabar isolando a carga não linear do sistema, fazendo com que ela não venha a influenciar negativamente equipamentos de outros pontos do sistema. Além disso, melhora outros pontos da qualidade de energia como o desequilíbrio de corrente e o fator de potência deixando o sistema mais perto do ideal.

1.20.1 Proposta de continuidade

Como proposta de continuidade dos trabalhos é sugerido a montagem do filtro ativo que foi simulado e instalá-lo na subestação mais adequada, além de um estudo custo para sua implementação na UFRN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

A POMILIO, J, **Pré-reguladores de Fator de Potência**, Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/pfp/Cap1.pdf>>, Acesso em: 1 out, 2019

AHRABIAN, Ghasem; SHAHNIA, Farhad; HAQUE, Mehrdad, Hybrid Filter Applications for Power Quality Improvement of Power Distribution Networks Utilizing Renewable Energies, **2006 IEEE International Symposium On Industrial Electronics**, [s,l,], p,1-10, jul, 2006, IEEE, <http://dx.doi.org/10.1109/isie.2006.295801>

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica –, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8**, 2018, Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>, Acesso em: 05 out, 2018

ARRILLAGA, J,; WATSON, N, R,, **Power system harmonics**, 2, ed, [s, L,]: Wiley, 2003, 389 p

AKAGI, H, New Trends in Active Filters for Power Conditioning, **IEEE Transactions on Industry Applications**, v, 32, n, 6, p, 1312-1322, 1996

AKAGI, Hirofumi; KANAZAWA, Yoshihira; NABAE, Akira, Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components, **IEEE Transactions On Industry Applications**, [s,l,], v, -20, n, 3, p,625-630, maio 1984, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), <http://dx.doi.org/10.1109/tia.1984.4504460>

B,P,LATHI, **Sinais e sistemas lineares**, 2, ed, Porto Alegre: Bookman, 2007, 856 p,

BARBI, Ivo, **Eletrônica de potência**, 6, ed, Florianópolis: Ivo Barbi, 2006, 315 p,

BOLOTINHA, Manuel, **FUNDAMENTOS DE SISTEMAS TRIFÁSICOS**, 2019, Disponível em: <<http://universolambda.com.br/fundamentos-de-sistemas-trifasicos/>>, Acesso em: 30 set, 2019

COSERN (Rio Grande do Norte), **Companhia Energética do Rio Grande do Norte**, Disponível em: <<http://www.cosern.com.br/>>, Acesso em: 29 mar, 2011,

DAS, J,c,, Passive filters-potentialities and limitations, **Conference Record Of The 2003 Annual Pulp And Paper Industry Technical Conference, 2003**,, [s,l,], p,187-197, jun, 2003, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), <http://dx.doi.org/10.1109/papcon.2003.1216916>,

Divan, D, M, S,, Bhattacharya and Banerjee B, B, **Synchronous frame harmonic isolator using active series filter**, EPE'91, 03, 1991,

DUGAN, R, C, et al, **Electrical Power Systems Quality**, 3, ed, Nova Iorque: Mcgraw-hill, 1996, 558 p,

ELETRABRAS DISTRIBUIÇÃO PIAUÍ, **Estudo Sobre Métodos de Filtragem Harmônica e Correção de Fator de Potência em Rede de Distribuição de Baixa Tensão**, Rio de Janeiro: Eletrobras

FERACIN NETO, Angelo, **FILTROS ATIVOS PARALELOS APLICADOS A SISTEMAS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS**, 2009, 149 f, Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009,

IEEE STANDARDS ASSOCIATION, **IEEE 519**: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, New York, 2014

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, **IEC 61000-3-4**: Electromagnetic compatibility (EMC), part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A, 1 ed, New York: Iec, 1998, 10 p, Disponível em: <www.iec.ch>, Acesso em: 02 out, 2019,

IRWIN, David, **Análise de Circuitos em Engenharia**, 4, ed, São Paulo: Pearson, 2000,

KHADKIKAR, V,; CHANDRA, A,, An independent control approach for three-phase four-wire shunt active filter based on three H-bridge topology under unbalanced load conditions, **2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference**, [s,l,], p,300-325, jun, 2008, IEEE, <http://dx.doi.org/10.1109/pesc.2008.4592699>,

LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo, **Harmônicos em Sistemas Elétricos**, Rio de Janeiro: Elsevier, 2014, 54 p,

Lima A, G, G, and Greenhalgh A, B,, Active Filters and the Zero Sequence Component, **COBEP'93**, vol, 1, pp, 210-224, 1993

LIMA, Kleber, **Transformada de Clarke e Park**, Fortaleza-ce: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015, 23 slides, color, Disponível em: <[https://pt,slideshare,net/jmgn/transformadas-clark-e-park](https://pt.slideshare.net/jmgn/transformadas-clark-e-park)>, Acesso em: 20 out, 2019

Liu, Jinjun, Jun Yang, Zhaoan Wang, A New Approach For Single-Phase Harmonic Current Detecting And Its Application In A Hybrid A C T N Power Filter, **IEEE**, 1999,

MORAES, Ernande Eugenio Campelo, **ESTUDO E PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA ATENUAÇÃO DE HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**, 2011, 137 f, TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011, Disponível em: <<http://www,dee,ufc,br/anexos/TCCs/2011,1/ERNANDE%20EUGENIO%20CAMPELO%20MORAIS,pdf>>, Acesso em: 08 out, 2018,

NOGUEIRA, Mozart Daniel Oliveira, **PROJETO DE FILTRO HÍBRIDO A QUATRO FIOS PARA APLICAÇÃO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO: UM ESTUDO DE CASO**, 2018, 94 f, TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-ce, 2018,

PAIVA, João Maria Vital de, **PROPOSTA DA NOVA TOPOLOGIA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO DO CAMPUS CENTRAL DA UFRN A PARTIR DA ENTRADA EM OPERAÇÃO DA SUBESTAÇÃO 69 KV**, 2019, 235 f, Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Energia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - Rn, 2019,

STAROSCA, Eng, José, **Compensação reativa em Instalações elétricas**, São Paulo: Eng, José Starosca, 2019, 95 slides, color, Disponível em: <http://www,oitonovetres,com,br/documentos/posgrad/posgrad_starosta_parte6-comp_reat,pdf>, Acesso em: 14 out, 2019,

PAULILO, Gilson, **Capítulo I Conceitos gerais sobre qualidade da energia**, Disponível em: <http://www,osetoreletrico,com,br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1,pdf>, Acesso em: 24 set, 2019

Peng, F, Z,, Akagi H, and Nabae A,, A Study of Active Power Filters Using QuadSeries Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation, **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol, 5, no, 1, Janeiro1990

SILVA, Sergio Augusto Oliveira da, **Sistemas de Energia Ininterrupta Line Interactive Trifásicos com Compensação Ativa de Potência Série e Paralela**, 2001, 219 f, Tese (Doutorado) - Curso de

Engenharia Elétrica, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001,

SILVA, Sergio Augusto Oliveira da; MODESTO, Rodrigo A.; BARBOSA, Lucio dos Reis, Dynamic Response Improvement of a Three-Phase Line Interactive UPS System with Active Power Line Conditioning, **2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference**, [s.l.], v, 1, n, 1, p,1055-1059, jun, 2007, IEEE, <http://dx.doi.org/10.1109/pesc.2007.4342138>,

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN, **Resolução Nº 028/2017 – CONSAD**, Plano diretor do Campus Universitário Central, Natal, 2017,

YOKOGAWA, **CW500 - Power Quality Analyzer - Getting Started Guide**, 2017, Disponível em: <<https://cdn.tmi.yokogawa.com/IMCW500-02EN.pdf>>, Acesso em: 24 mar, 2019

Watanabe, E, H, & Stepham, R, M, Potência Ativa e Reativa Instantânea em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas – **SBA, Rev, Controle & Automação**, Vol, 3 nº1, Mar/Abr,1999,

Watanabe, E, H, & Stepham, R, M, **Potência Ativa e Reativa Instantânea em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas** – SBA, Rev, Controle & Automação, Vol, 3 nº1, Mar/Abr,1991

APÊNDICE A

PROJETO DOS GANHOS K_p E K_i DOS CONTROLADORES PI

Para o cálculo dos ganhos K_p e K_i foram utilizados os parâmetros de margem de fase do sistema compensado (m_{fi}/θ_{sc}) e a frequência de cruzamento (w_c) como é ilustrado na tabela 35.

Tabela 35 – Parâmetros adotados para o cálculo dos ganhos

Controlador PI malha de corrente
M_{fi} ou $\theta_{sc}=90^\circ$
Frequência de chaveamento (F_s) = 20 KHz
$w_{c1} = (2 \cdot \pi \cdot f_s)/4$ rad/s
Controlador PI malha de tensão
$m_{fi}=70^\circ$
$w_{c2} = w_{c1}/250$ rad/s

Fonte: Próprio Autor

Onde:

m_{fi} – margem de fase (graus);

F_s – Frequência de chaveamento do PWM (Hz);

w_c – Frequência de cruzamento adotada (rad/s);

Segundo Barbi (2006), em sistemas do tipo chaveados a margem de fase é mantida entre 45° e 90° . A frequência de corte deve ser a mais alta possível de maneira a se obter uma resposta rápida do sistema, Segundo (BARBI, 2006) a frequência de corte deve se situar em torno de $w_c \approx w_s/4$, pois se for utilizada uma frequência de corte muito próxima da frequência de chaveamento o sistema não pode mais ser tratado como sistema contínuo.

Para o cálculo dos ganhos K_p e K_i serão utilizadas as equações (A1), (A2), (A3) e (A4) equações nas quais foram baseadas na figura 67, a qual representa o Plano do eixo imaginário e real do controlador PI.

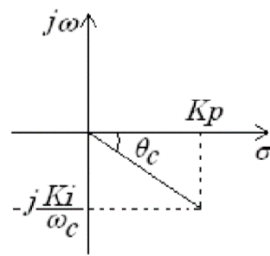


Figura 67 – Plano s controlador PI

Fonte: Próprio Autor

$$K_i = -K_p \cdot \omega_c \cdot \tan \theta_c \quad (A1)$$

$$K_p = M_c \cdot \cos \theta_c \quad (A2)$$

$$M_c = -M_g \quad (A3)$$

$$\theta_c = \theta_d - (\theta_{sc} + 180^\circ) \quad (A4)$$

Onde:

θ_c - Ângulo de defasagem do controlador;

M_c – Módulo do Controlador PI;

M_g – Módulo do Planta do sistema;

θ_d – Margem de fase desejada do sistema;

Com base na equação (A3), pode-se constatar que o módulo do controlador é oposto ao módulo da planta, com isso a margem de fase desejada vai ser sempre oposta a margem de fase do sistema, chegando assim a um valor de θ_c muito próximo a zero.

Desta forma, os valores dos ganhos K_p e K_i ficam definidos conforme a tabela 36.

Tabela 36 – Ganhos adotados do Filtro Ativo na topologia Split- Capacitor

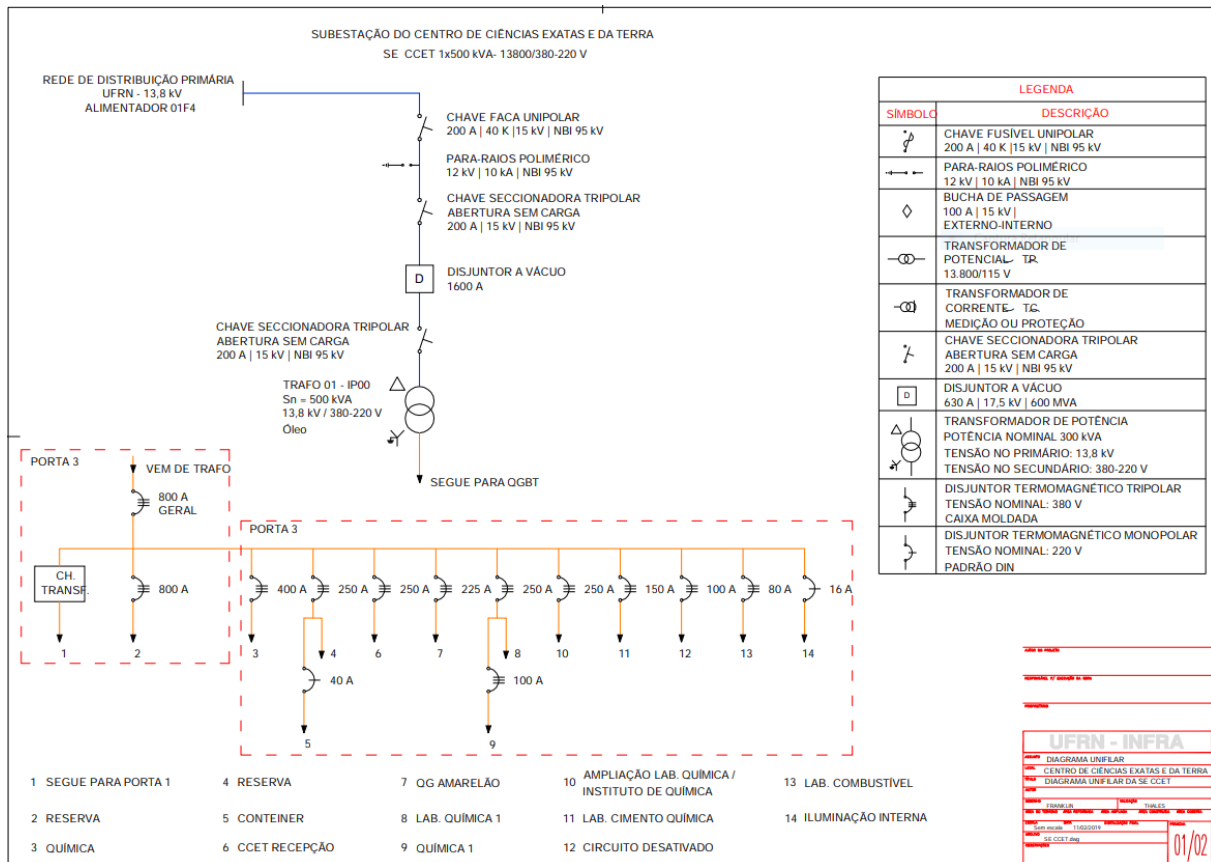
Controlador PI malha de corrente
$K_p=31,41$
$K_i=1570$
Controlador PI malha de tensão
$K_p=0,4018$
$K_i=18,3763$

Fonte: Próprio Autor

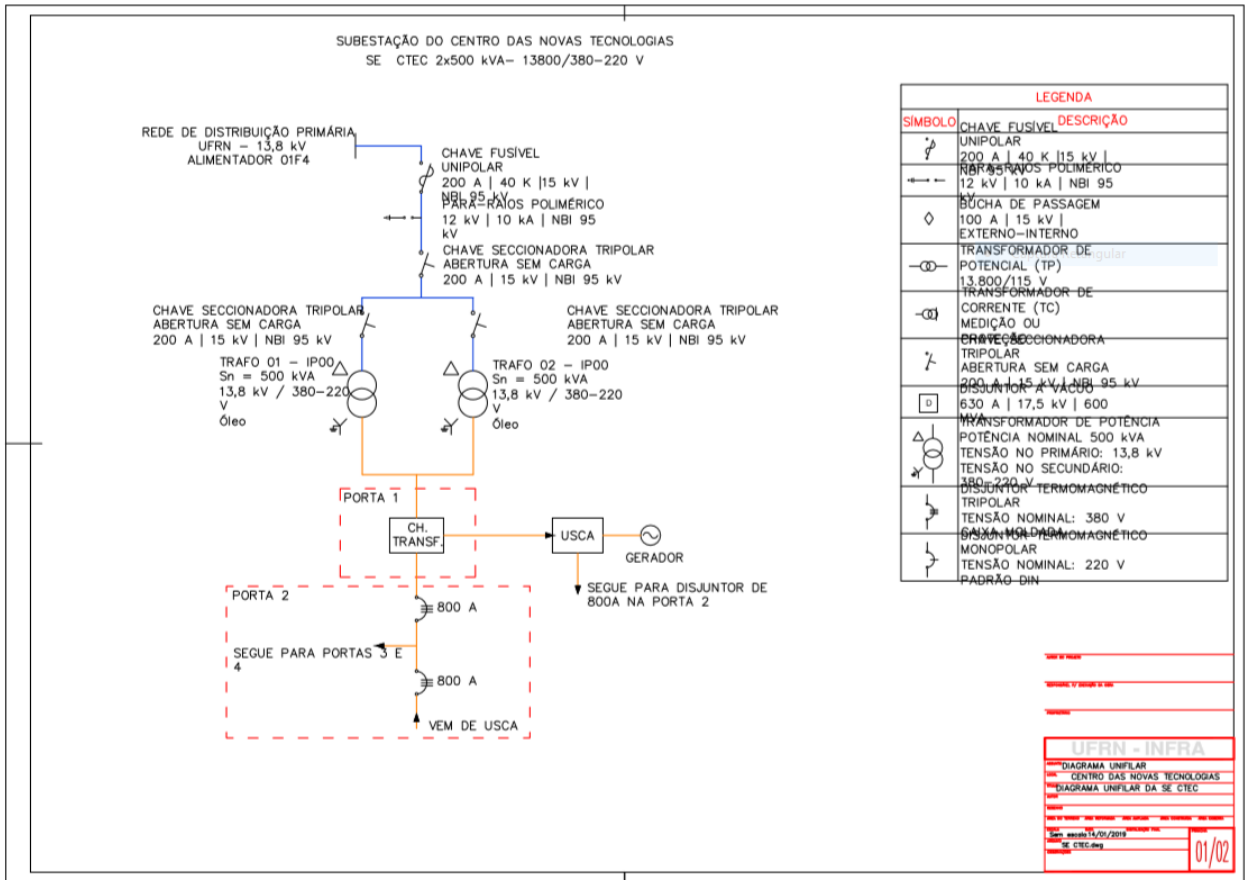
APÊNDICE B

DIAGRAMAS UNIFILARES

• DIAGRAMA UNIFILAR CCET



• **DIAGRAMA UNIFILAR CTEC**



APÊNDICE C

ARTIGO – CONGRESSO

Foi publicado no 12º Seminário sobre Eletrônica de Potência e Controle, realizado em Natal-RN entre os dias 27 e 30 de Outubro de 2019, um artigo que teve como título: Projeto e Análise de Filtros Harmônicos para a utilização em Subestação da UFRN, ele pode ser acessado pelo o link do congresso a seguir: <http://sepoc2019.ct.ufrn.br/sepoc2019/images/arquivos/papers/track6/45,-Projeto-e-Anlise-de-Filtros-Harmnicos-para-utilizao-em-Subestao-da-UFRN.pdf>

Projeto e Análise de Filtros Harmônicos para utilização em Subestação da UFRN

Ênio Vale de Oliveira Cunha

Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica
UFRN
Natal – RN, Brasil
enio_vale@hotmail.com

Crisluci Karina Souza Santos Cândido

Max Chianca Pimentel Filho
Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica
UFRN
Natal -RN, Brasil

Resumo — O presente trabalho trata da implementação e simulação no software PSIM® dos três mais comuns tipos de filtros para harmônicos de corrente, que são o filtro passivo, ativo e híbrido, na subestação do CTEC (Complexo Tecnológico de Engenharia) na UFRN a fim de melhorar os resultados obtidos na análise de harmônicos registrados em equipamentos analisadores de energia e baseando-se nesses resultados escolher o melhor tipo de filtro para essa determinada situação. Além disso é feito o dimensionamento dos compensadores do filtro ativo e passivo, e uma análise geral do sistema abordado com o intuito de se simular o sistema mais realista possível.

Palavras-Chave— Corrente, Dimensionamento, Filtros Harmônicos, Simulação.

I. INTRODUÇÃO

Com o decorrer do tempo os avanços científicos e tecnológicos estão se intensificando consideravelmente, principalmente na área da eletrônica. Porém, esse avanço trás consigo um aumento da quantidade de cargas não-lineares em todo o sistema elétrico, tal fato restringe a certeza da confiabilidade do sistema como um todo, pois acaba acarretando, por exemplo numa correção de fator de potência mais elaborada, em consequência, principalmente, da distorção harmônica de tensão e corrente [1]. Além dos harmônicos de tensão e corrente existem outros tipos de distorções [4]:

- Offset (deslocamento CC): Ocorre pela presença de tensões e correntes de valor médio diferente de zero;
- Inter-harmônicos: São perturbações causadas por componentes de corrente que não estão relacionados com a fundamental. Essas podem ser geradas por fornos a arco, por exemplo [3].
- Notching: Perturbações periódicas com conteúdo harmônico em alta frequência que ocorre sobre a tensão devido a operação dos dispositivos semicondutores [1].

Para a elucidação de problemas envolvendo harmônicos, comumente, são utilizadas as mitigações passivas, ativas ou híbridas. As passivas resumem-se a apenas indutores e capacitores instalados no sistema, as ativas aplicam filtros ativos séries ou paralelos, as quais utilizam como principal elemento o conversor CC/CA controlado e, por último, as híbridas que são a junção do filtro passivo e do ativo[2].

Com base nisso esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo a respeito do nível de harmônicos em todo o Campus Natal Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). O estudo foi realizado com o auxílio de um analisador de energia da YOKOGAWA®, cujo modelo é o CW500, o qual coletou todos os dados de harmônicos nos mais variados pontos da universidade. Com os dados coletados, constatou-se que a subestação do CTEC (Complexo Tecnológico de Engenharia) apresentou uma alta taxa de distorções harmônicas de corrente (THDi). Para a solução dessa situação foram simulados no sistema reduzido do Campus Central da UFRN os três tipos de filtros citados anteriormente através software PSIM® a fim de se comprovar a eficiência de tais filtros na mitigação de harmônicos e a partir dos resultados coletados escolher qual o melhor tipo de filtro para essa situação.

A escolha dos tipos de filtros teve como base o fato de tais filtros serem os mais utilizados no mercado, sendo um filtro passivo RLC série Shunt, um de 3º e outro de 5º ordem, o filtro ativo, composto por um inversor de tensão com três braços e um filtro híbrido composto pelos os filtros ativo e passivos citados.

II. DEFINIÇÃO DAS TOPOLOGIAS DOS FILTROS

A. Filtro Passivo

Os filtros passivos são os mais empregados para a mitigação de harmônicos devido a sua simples composição, pois têm um custo inferior quando comparado aos outros métodos de filtragem e são de fácil dimensionamento. Eles podem ser classificados como filtros sintonizados ou amortecidos de 1ª, 2ª, 3ª ordem e do tipo C [5]. Além disso, existe ainda a forma de conexão com a rede que pode ser em série, o que funciona como um circuito de bloqueio para um certo nível de harmônicos, ou em paralelo, que atua como um caminho de baixa impedância para uma determinada faixa de frequência. A preferência pela a utilização fica pela a topologia em paralelo, pois o filtro série tende a ser mais robusto por passar toda a corrente do circuito por ele e consequentemente acaba ficando com um custo mais elevado [1].

B. Filtro Ativo

Os filtros ativos são assim chamados por serem formados por um conversor chaveado, na maioria dos casos um inversor

de frequência, o qual emite uma onda de tensão ou de corrente contendo harmônicas. Eles agem emitindo harmônicos que impedem que estas fluam pelo sistema tanto a jusante como a montante. Podem ser dispostos tanto em série como em paralelo [1].

Estes componentes têm desvantagens operacionais menores quando comparado com os filtros passivos, porém são bem mais complexos, principalmente por causa da sua estrutura de controle. Além de mitigar harmônicos, eles podem corrigir fator de potência e balancear cargas e tensões da instalação [6].

Os filtros ativos podem ser série ou paralelo, o filtro ativo paralelo, como é mostrado na Figura 1, que será a tipologia utilizada neste trabalho, é o mais comum entre os dois tipos e atua como uma fonte de corrente de harmônicos, através do conversor, com a intenção de compensar a corrente distorcida drenada pela carga [7]. Desta maneira a fonte acaba enxergando a carga como sendo linear e não prejudica outras cargas ligadas a essa mesma fonte.

C. Filtro Híbrido

O filtro híbrido apresenta uma solução alternativa para o uso de filtros passivos e ativos. Tais filtros são constituídos pelos elementos passivos ressonantes e por conversores eletrônicos. Este equipamento é o mais apropriado no quesito eficiência quando comparado com os outros dois tipos de filtros, pois apresenta um bom comportamento em relação à mitigação dos harmônicos com um investimento não tão elevado [8].

Será realizada na simulação a modelagem do filtro híbrido formado pela junção do filtro ativo paralelo e pelo filtro passivo RLC série shunt.

III. ESTRATÉGIA DE CONTROLE – FILTRO ATIVO

A mitigação harmônica ativa abordada nesse trabalho é fundamentada no método baseado no sistema de eixos de referência síncrona (Método SRF-Synchronous Reference Frame Method), onde as grandezas estacionárias das coordenadas a-b-c são transformadas para um referencial síncrono d-q-0. Esse tipo de compensação é composto basicamente por duas transformações invariantes em relação a potência. A primeira é conhecida como transformada de Clarke e a segunda de transformada de Park que são mostradas nas equações (1) e (2), respectivamente.

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_{ALFA} \\ X_{BETA} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X_d \\ X_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{ALFA} \\ X_{BETA} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Para a aplicação da transformada de Park é necessário calcular as coordenadas do vetor unitário $\cos\theta$ e $\sin\theta$. O ângulo θ pode ser obtido da rede via um circuito PLL (Phased-Locked Loop), no qual se baseia na teoria da potência reativa instantânea. O resultado dessa estratégia é a obtenção de um sistema de referência síncrono, composto por dois eixos síncronos denominados eixo direto d e eixo em quadratura q, além da componente homopolar (sequência zero). As parcelas das componentes fundamentais dos eixos d e q podem ser obtidas através de filtros passa-baixa.

A figura 1 mostra o diagrama unifilar de blocos de um compensador SRF de corrente aplicado a um filtro ativo de potência onde as correntes, que são usadas para mitigar os harmônicos, são obtidas a partir de correntes de carga. Segundo uma análise feita por [10] este arranjo apresenta características superiores quando comparado com um filtro ativo convencional.

Um ponto importante para implementação do compensador SRF é a escolha da frequência de corte do filtro passa baixa (FPB). Ela é escolhida com base em sistemas desbalanceados, como o da UFRN por exemplo, onde a componente de sequência negativa ($n=2,5,8,11,etc.$) fundamental de corrente está presente nas correntes da carga. Essa componente é responsável pelo aparecimento de componentes de 120 Hz no eixo síncrono d-q do compensador. Para garantir a filtragem destas componentes o filtro deverá possuir uma frequência de corte de 12 Hz, que representa uma década abaixo da menor frequência a ser filtrada [10].

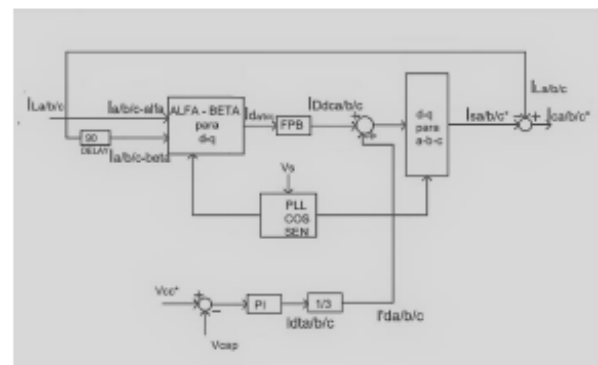


Fig. 1. Diagrama de blocos do algoritmo SRF para a topologia split capacitor.

Outro ponto de grande relevância é o controle da tensão no barramento cc do inversor do filtro ativo, o qual, devido às perdas inerentes ao inversor, tende a diminuir. Portanto existe a necessidade de se incluir uma malha de controle de tensão no circuito de controle do filtro. A malha atua compensando as perdas e mantendo a tensão no barramento CC desejada. Neste método uma parcela cc proveniente do controlador de tensão é adicionada a potência P_h fazendo com que o filtro drene a potência ativa da rede compensando as perdas. A figura 1 mostra um que a saída do compensador deve ser adicionada à parcela oscilante da corrente I_d , como também mostra que a saída do controlador de tensão é dividida por três

antes de se somar a corrente I_d de cada fase. Desta forma a potência ativa drenada das fases é dividida em parcelas iguais entre cada fase [11].

IV. ANÁLISE MATEMÁTICA

Para a implementação do sistema de controle do filtro ativo de potência é necessária toda a modelagem do sistema físico do filtro ativo, além do dimensionamento dos controladores do sistema e dos filtros passivos que serão simulados no trabalho.

Com base nisso, serão abordados os seguintes pontos para o cálculo dos filtros utilizados na simulação:

- Dimensionamento do Filtro passivo RLC série shunt de 3ª e 5ª ordem;
- Modelagem dos sistemas de corrente e tensão.

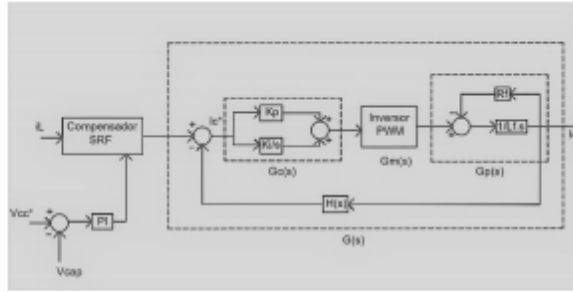


Fig. 2. Diagrama de blocos da malha de controle de corrente do filtro ativo de potência.

A. Modelagem dos sistemas de corrente e tensão

O diagrama de blocos da malha de corrente do filtro ativo paralelo está representado pela a figura 2. Partindo do pressuposto de que o ganho do inversor PWM seja unitário, ou seja, se desconsidera a não linearidade e possíveis perdas, com isso a função de transferência do inversor passa a valer $G_m(s) = 1$ [10].

Já a função de transferência do controlador PI em paralelo é dada pela a equação (3).

$$G_c(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \quad (3)$$

O modelo da planta, ou seja, do sistema físico, é composto por uma indutância em série com uma resistência conforme a figura 2. A equação (4) representa a função de transferência da planta considerada na malha de corrente do filtro ativo de potência, onde L_f é igual a 0,1 mH e R_f é igual a 0,05 Ω .

$$G_p(s) = \frac{1}{L_f \cdot s + R_f} \quad (4)$$

Considerando o sensor de corrente unitário, ou seja, $H(s)=1$. A função de transferência de malha aberta e fechada são dadas pelas as equações (5) e (6).

$$G_{MA}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_f \cdot s^2 + R_f \cdot s} \quad (5)$$

$$G_{MF}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{L_f \cdot s^2 + (R_f + K_p) \cdot s + K_i} \quad (6)$$

Já a modelagem do sistema de controle de tensão do barramento cc será realizada segundo [10], em que o diagrama de blocos da malha de tensão do filtro ativo está ilustrado na figura 4. Onde $(G_c(s) = K_p + K_i/s)$ representa o controlador PI e $(G_{inv}(s)=1)$ representa a função de transferência do inversor.

A função de transferência em malha fechada do diagrama de blocos da figura 3 é dada pela a equação (7).

$$G_{MF}(s) = \frac{\frac{K_i \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}} \cdot \left(\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1 \right)}{s^2 + \frac{K_p \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}} \cdot s + \frac{K_i \cdot v_d}{C_{cc} \cdot V_{cc}}} \quad (7)$$

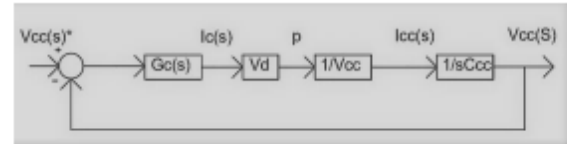


Fig. 3. Diagrama de blocos da malha de tensão do filtro ativo

B. Dimensionamento do filtro RLC série shunt de 3ª e 5ª ordem

Através dos resultados coletados das simulações, constatou-se que os harmônicos de 3ª e 5ª ordens são os que estão em maior evidência no espectro de frequência, por esse motivo eles foram os escolhidos para a implementação dos filtros passivos.

Para o dimensionamento foram utilizadas as equação (8), a qual resulta no valor da resistência, juntamente com as equações (9) e (10) que resultam nos valores de indutância e capacitância desse tipo de filtro.

$$R = \frac{K \cdot I1}{(h^2 - k^2 \cdot I1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K \cdot I1 + \sqrt{(R_s \cdot I1)^2 + (h \cdot w \cdot L_s)^2 \cdot (h^2 - k^2 \cdot I1^2)} \right] \quad (8)$$

$$L = \frac{R \cdot Q}{h \cdot W} \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{h \cdot w \cdot R \cdot Q} \quad (10)$$

Em que o Q é o fator de qualidade do filtro cujo valor é 50, o K é a constante de distorção cujo valor foi escolhido em 0,12 para 3ª ordem e 0,0025 para 5ª ordem, h a ordem do harmônico que foi escolhido para ser filtrado [9].

V. SISTEMA UTILIZADO NA MEDIÇÃO

A. Caracterização do sistema utilizado

Para a medição dos harmônicos foi utilizado um analisador de qualidade de energia da YOKOGAWA do modelo CW500, cuja medição foi realizada na subestação do CTEC na UFRN.

A fim de chegar na impedância equivalente vista pela a subestação do CTEC, coletou-se diversos dados do sistema como o equivalente de Thévenin vista pela a subestação central da UFRN, a impedância da linha de 13,8 kV que liga à subestação central à subestação do CTEC e a impedância dos transformadores tanto da SE do CTEC como da SE central, o que resultou em uma impedância equivalente de valor $0,000962977 + j 4,576799 \times 10^{-4} \Omega$.

B. Medição e valores dos harmônicos de corrente no sistema

A medição foi feita no lado de baixa tensão dos transformadores da subestação do CTEC, pois foi o local onde teve o maior nível de harmônicos de correntes, no horário comercial, dentre todos os outros pontos coletados na universidade, esses dados foram coletados às 12:11 do dia 21/03/2019.

Os valores dos harmônicos de corrente, de potência ativa em cada fase e o fator de potência estão representados pela a tabela I.

TABELA I. Valores dos Harmônicos de Corrente

N	Fase A	Fase B	Fase C
	Corrente	Corrente	Corrente
1ª	103,99 A	106,3 A	119 A
2ª	8,678 mA	7,36 mA	81,4 mA
3ª	9,0456 A	15,07 A	11,38 A
4ª	0 A	0 A	0 A
5ª	12,065 A	10,90 A	12,0 A
6ª	0 A	1,2 mA	0 A
7ª	12,502	13,25 A	12,18 A
8ª	0 A	0 A	0 A
9ª	4,6632 A	5,85 A	4,539 A
10ª	0 A	0 A	0 A
11ª	422,5 mA	1,264 A	733 mA
12ª	0 A	0 A	0 A
13ª	2,8320 A	2,289 A	2,53 A
THD	19,72%	22,35%	17,94%
P (Kw)	23,657	24,050	26,790
F.P.	0,9216	0,9152	0,9243

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para o presente trabalho é utilizado a topologia de filtros ativos Split-Capacitor de três fios, mostrada na figura 4 juntamente com os filtros passivos, ela faz uso de dois capacitores com um ponto médio ligado a um ponto comum e mais três braços de inversores. Essa topologia é uma escolha apropriada quando se trata de sistemas de média e baixa potência por apresentar um número reduzido de chaves. Em outras aplicações que envolvem alta potência essas topologias não são as mais adequadas [10].

Para uma melhor apresentação dessa topologia será apresentado na tabela II os valores da resistência, capacitância e indutância dos filtros passivos, os valores dos ganhos dos controladores de corrente e tensão; e o valor dos capacitores

utilizados no inversor e a tensão aplicada nos mesmos, cuja valor vai se situar entre 25% a 50% do valor de pico da tensão da fonte, neste trabalho utilizou-se o valor de 40% maior que a tensão de pico, portanto 450 V [12].

Com base no sistema apresentado, a primeira situação consiste no sistema sem nenhum tipo de filtro, onde as figuras 5 e 6 ilustram as formas de onda nas três fases e no neutro respectivamente, já a figura 8 mostra as formas de onda da tensão nas três fases.

Com base nos gráficos que foram mostrados, primeiramente será utilizado no sistema os filtros passivos de 3ª e 5ª ordens, onde a figura 8 ilustra as formas de onda na carga e na fonte, além da figura 9 que mostra a corrente do neutro no sistema.

Ademais foi feito também a coleta dos resultados com apenas o filtro ativo onde as figuras 10 e 11, mostram, respectivamente, as formas de onda da corrente em todas as fases na fonte, filtro e carga e a forma de onda da corrente do neutro da fonte.

Por último será implementado o filtro híbrido, o qual é a combinação do filtro passivo com o filtro ativo de potência, os resultados desta implementação são as formas de onda das correntes das fases a, b e c, da fonte e carga na figura 12. Já a corrente de neutro demonstra forma de onda muito próxima a do filtro ativo.

Para uma melhor compreensão dos resultados pode-se relacionar os resultados da tabela III com a I e constatar a melhora que o sistema teve com a execução dos filtros harmônicos. Além também da eficiência que tanto o filtro passivo como o filtro ativo mostraram nas simulações.

TABELA II. Valores dos ganhos dos controladores e dos componentes dos filtros passivos.

Controlador Corrente	Kp	31,41
	Ki	1570
Controlador Tensão	Kp	0,4018
	Ki	18,3763
Filtro Passivo – 3ª Ordem	L	3,44 mH
	C	241 uF
	R	0,077Ω
Filtro Passivo – 5ª Ordem	L	1,1338 mH
	C	263 uF
	R	0,042Ω

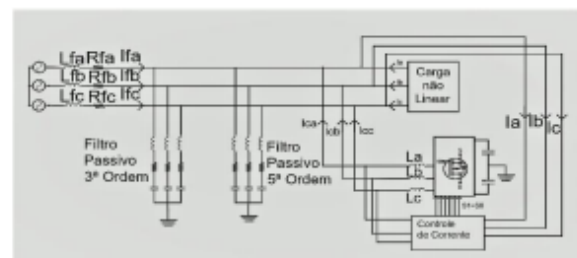


Fig. 4. Sistema da Simulação

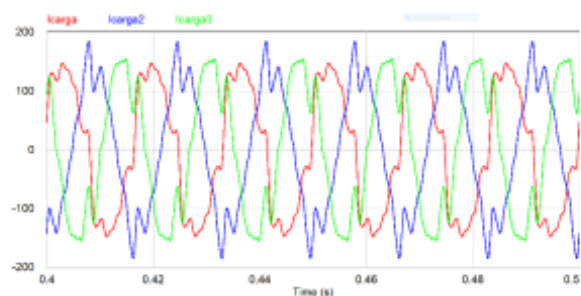


Fig. 5. Correntes a,b e c sem filtro

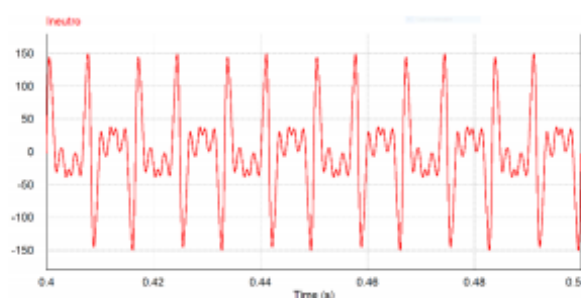


Fig. 6. Corrente de neutro sem filtro

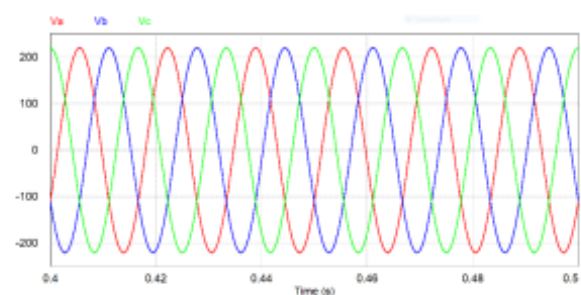


Fig. 7. Formas de onda de tensão das fases a,b e c

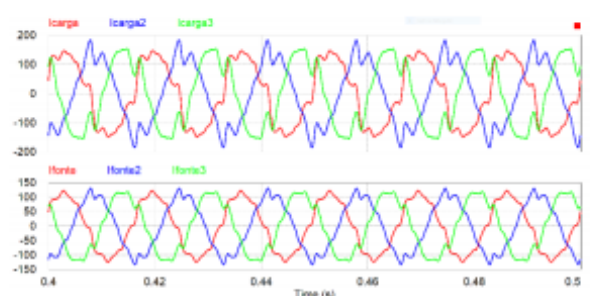


Fig. 8. Formas de onda da corrente nas fases a, b e c, na fonte e na carga, com o filtro passivo.

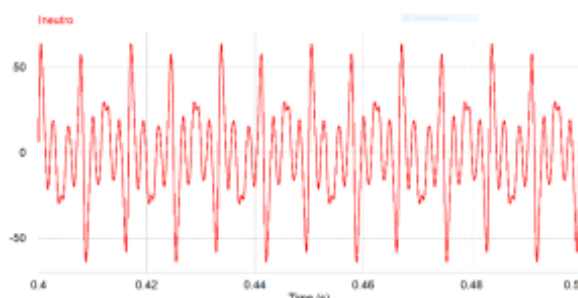


Fig. 9. Corrente do neutro com filtro passivo

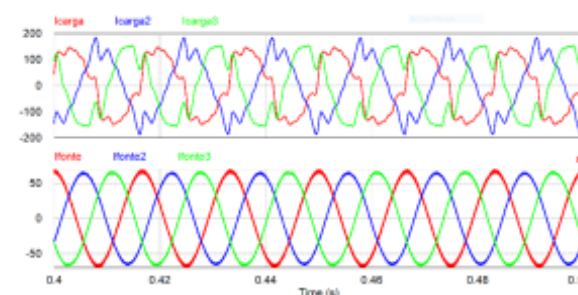


Fig. 10. Formas de onda da corrente nas fases a, b e c, na fonte e na carga, com o filtro ativo

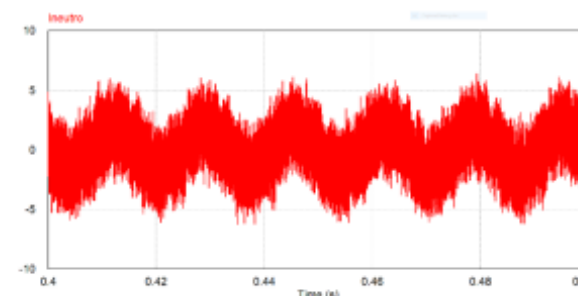


Fig. 11. Formas de onda da corrente no neutro com o filtro ativo.

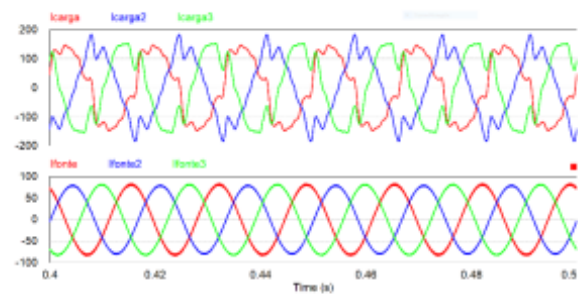


Fig. 12. Formas de onda da corrente nas fases a, b e c, na fonte e na carga, com o filtro híbrido

Com base nos resultados expostos acima foi feita a tabela IV para expor os resultados de índices de distorções harmônicas antes da implementação dos filtros e depois da

implementação, assim como o fator de potência e os valores das correntes de neutro nessas duas situações.

Pelos os resultados coletados na tabela IV, pode-se notar a sensível melhora nos índices de distorções harmônicas com a aplicação dos filtros, em especial com o filtro ativo e híbrido, assim como pode-se observar uma melhora significativa da corrente de neutro mostrando a correção que foi feita no desequilíbrio das correntes de fase. A respeito do fator de potência houve uma pequena e grande melhora com o filtro passivo e ativo, respectivamente, porém no filtro híbrido, quando comparado com o filtro ativo, ocorreu uma piora no fator de potência, devido a implementação do filtro passivo, mesmo assim um resultado melhor que a simulação sem filtro.

Tabela III. Módulo da corrente em cada fase e ordem em relação a cada filtragem implementada

	Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª
Filtro Passivo	la -A	80,29	0,23	2,60	0	1,21	0	6,51
	lb -A	54,73	1	2,23	0	1,16	0	4,65
	lc -A	73,04	0,96	5,70	0	1	0	6,94
Filtro Ativo	la -A	39,8	0,95	0,30	0	0,12	0	0,12
	lb -A	44,05	0,39	0,67	0	0,30	0	0,14
	lc -A	40,75	0,95	0,57	0	0,37	0	0,22
Filtro Híbrido	la -A	57,27	0,09	0,21	0	0,01	0	0,32
	lb -A	55,98	0,07	0,16	0	0,04	0	0,03
	lc -A	57,55	0,03	0,23	0	0,03	0	0,03

Tabela IV. Resultados das implementações dos filtros ativo, passivo e híbrido

		Sem Filtro	Filtro Passivo	Filtro Ativo	Filtro híbrido
THD	Fase A	19,60%	10,2%	1,4955%	0,093%
	Fase B	21,39%	11,66%	1,5701%	0,092%
	Fase C	17,41%	10,38%	1,4777%	0,090%
Neutro (A)		63,68 Arms	27,33 Arms	1,90 Arms	1,75 Arms
Fator de Potência	Fase A	0,9216	0,9236	0,996	0,96
	Fase B	0,9152	0,9189	0,998	0,96
	Fase C	0,9243	0,9265	0,996	0,96

VII. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi abordado a implementação de filtros harmônicos em uma subestação da UFRN. Através do simulador PSIM® foi possível verificar a eficiência da mitigação realizada. Antes verificava-se uma distorção harmônica considerável, no local, a qual poderia causar, no futuro, defeitos nos equipamentos, mas ao inserir os filtros a distorção foi reduzida consideravelmente.

Desta forma como o principal objetivo era constatar a eficiência da mitigação e dentre as medições feitas a que teve o pior resultado foi a subestação da CTEC.

Além da eficiência observada, é interessante salientar também que o trabalho possui um papel inovador para a UFRN a qual nunca foi feito nenhum trabalho do tipo na instituição, projeto no qual pode ser ampliado por todo o

campus buscando pontos de grandes distorções e afim de procurar solucioná-los, além de sua implementação na prática.

Para trabalhos futuros pretende-se implementar outras topologias de filtros com o objetivo de comparar os resultados e escolher a melhor topologia para esse tipo de instalação, além disso poderá fazer uma análise de custos para reforçar a escolha do melhor filtro ativo para o CTEC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEÃO, Ruth Pastora Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 354 p.
- [2] AKAGI, H.; **Modern Active Filters and Traditional Passive Filters**. *Bulletin of Polish Academy of Sciences*, vol. 54, nº 3, 2006.
- [3] YACAMINI, R. Power System Harmonics. Part 3: Problems caused by distorted supplies. *Power Engineering Journal*, v. 9, n. 5, p. 233–238, 1995.
- [4] Institute of Electrical and Electronic Engineers. **IEEE 1159: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. New York: Ieee, 2009.
- [5] ELETROBRAS DISTRIBUIÇÃO PIAUÍ. **Estudo Sobre Métodos de Filtragem Harmônica e Correção de Fator de Potência em Rede de Distribuição de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2013.
- [6] Sasaki, h.; Machida, t. A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design. *Ieee Transactions On Power Apparatus And Systems*, [s.l.], v. -90, n. 5, p.2009-2019, set. 1971. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpas.1971.292996>.
- [7] Eletrobras distribuição PIAUÍ. **Especificação do Filtro Híbrido de Potência**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2014.
- [8] Nogueira, Mozart Daniel Oliveira. **Projeto de filtro híbrido a quatro fios para aplicação em rede de distribuição: um estudo de caso**. 2018. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-ce, 2018.
- [9] MORAES, Ernande Eugenio Campelo. **Estudo e projeto de filtros passivos para atenuação de harmônicos em instalações elétricas industriais**. 2011. 137 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <<http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2011.1/ERNANDE%20EUGENIO%20CAMPELO%20MORAIS.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2018.
- [10] Feracin Neto, Angelo **Filtros Ativos Paralelos Aplicados a Sistemas Elétricos Trifásicos a Quatro Fios**. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, 2009.
- [11] Silva, Sérgio Augusto de Oliveira **Sistemas de energia ininterrupta line interactive trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de pesquisa e desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001.
- [12] KHADKIKAR, V.; CHANDRA, A. An independent control approach for three-phase four-wire shunt active filter based on three H-bridge topology under unbalanced load conditions. **2008 Ieee Power Electronics Specialists Conference**, [s.l.], p.300-325, jun. 2008. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesc.2008.4592699>.