

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO  
DE FILTROS DE POTÊNCIA PASSIVO E ATIVO  
PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES  
HARMÔNICAS EM UM PRECIPITADOR  
ELETROSTÁTICO**

POLIANA ROCKENBACH MENDES

FOZ DO IGUAÇU  
2022



Poliana Rockenbach Mendes

**Análise Comparativa do Desempenho de Filtros de Potência Passivo e Ativo para Mitigação de Distorções Harmônicas em um Precipitador Eletrostático**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Elétricos e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior

Coorientador: Prof. Dr. Mauren Pomalis Coelho da Silva

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Rockenbach Mendes, Poliana

Análise Comparativa do Desempenho de Filtros de Potência Passivo e Ativo para Mitigação de Distorções Harmônicas em um Precipitador Eletrostático / Poliana Rockenbach Mendes; orientador Oswaldo Hideo Ando Junior; coorientadora Mauren Pomalis Coelho da Silva. -- Foz do Iguaçu, 2022.

112 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Foz do Iguaçu) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2022.

1. Qualidade de energia elétrica. 2. Filtros de Potência. 3. Distorções Harmônicas. I. Hideo Ando Junior, Oswaldo, orient. II. Pomalis Coelho da Silva, Mauren, coorient. III. Título.

# **Análise Comparativa do Desempenho de Filtros de Potência Passivo e Ativo para Mitigação de Distorções Harmônicas em um Precipitador Eletrostático**

**Poliana Rockenbach Mendes**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora assim constituída:

Prof. Dr. **Oswaldo Hideo Ando Junior** - (Orientador)  
Universidade Federal da Integração Latino Americana - UNILA

Prof. Dr. **Mauren Pomalis Coelho da Silva** - (Coorientador)  
Universidade Federal de Rondônia - UNIR

Prof. Dr. **Daniel Motter**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

Prof. Dr. **Enio Valmor Kassick**  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Data da defesa: 21 de fevereiro de 2022.



# Resumo

A automatização dos processos industriais traz consigo o aparecimento da distorção harmônica no sistema elétrico, uma vez que essa automatização é obtida por meio do uso de dispositivos semicondutores, o que resulta na inserção de cargas não lineares no sistema de distribuição de energia elétrica. Essa distorção pode causar perdas de energia destinadas ao Sistema Interligado Brasileiro (SIN), devido à grande presença de distorção harmônica nos serviços auxiliares de uma usina geradora, impactando assim, no ganho e lucro da empresa. Em geral, as distorções harmônicas devem ser mitigadas somente quando ultrapassam os limites normatizados e o momento ideal para analisar estratégias de mitigação é durante o projeto de novas instalações ou na compra de novos equipamentos que serão inseridos no sistema. Existem várias soluções de mitigação, entretanto nem todas são adequadas para um determinado problema, o que traz a necessidade de um estudo específico para cada caso. Entre as opções mais comuns para mitigar harmônicas, está a inserção de filtros de potência no sistema, cujo principal objetivo é reduzir a amplitude de correntes de uma ou mais frequências harmônicas. Este trabalho apresenta o dimensionamento, modelagem e simulação de quatro filtros de potência passivo shunt sintonizados e um filtro de potência ativo shunt. A simulação da inserção destes filtros no ponto de conexão comum do precipitador eletrostático de uma Usina Termelétrica (UTE), é feita no software ATP Draw®, para os filtros passivos e no MATLAB® para o filtro ativo. Para os filtros passivos, escolheu-se implementar os filtros passa-banda de sintonia simples em paralelo para as três maiores harmônicas encontradas no sistema (ordens 2, 4 e 8), a fim de analisar o desempenho da topologia quanto à mitigação destas distorções. Para o filtro ativo escolheu-se a topologia de inversor VSI com três pernas, utilizando a teoria dq para obtenção das correntes de referência. Fica evidente o benefício do uso do filtro passivo para mitigar as harmônicas de ordem 2 e 4 nesse sistema, levando em consideração que a complexidade e custo de projeto são baixos, entretanto escolheu-se a topologia de filtro ativo como melhor resultado para correção de distorções harmônicas de corrente neste ponto, visto que causa menor impacto energético no sistema.

**Palavras-chave:** Distorção Harmônica, Filtros de Potência, Qualidade de Energia Elétrica, Mitigação, MATLAB®, ATP Draw®.

# Abstract

The automation of industrial processes brings with it the appearance of harmonic distortion in the electrical system, since such automation is obtained through the use of semiconductor devices, resulting in insertion of non-linear loads in the electrical power distribution system. This distortion can cause energy losses destined for the Brazilian Interconnected System (SIN), due to the abundant presence of harmonic distortion in the auxiliary services of a power plant, which impacts the company's earnings and profits. In general, harmonic distortions should be mitigated only when they exceed standardized limits, and the ideal time to analyze mitigation strategies is during the design of new facilities or the purchase of new equipment that will be inserted into the system. Currently, there are several harmonic mitigation solutions, but they cannot be used in a generalized way, which brings the need for a specific study for each case. Among the most used options to mitigate harmonics is the insertion of power filters in the power system, whose main objective is to reduce the amplitude of currents of one or more harmonic frequencies. This paper presents the design, modeling and simulation of four tuned passive shunt power filters and one active shunt power filter. The simulation of the insertion of these filters in the common connection point of the electrostatic precipitator of auxiliary services in a Thermal Power Plant, is done in the ATP Draw® software, for the passive filters and in MATLAB® for the active filter. It was chosen to implement the single-tuned band-pass filters in parallel for the three highest harmonics found in the system (orders 2, 4 and 8), in order to analyze the performance of the topology regarding the mitigation of these distortions. For the active filter, the VSI inverter topology with three legs was chosen, using the dq theory to obtain the reference currents. The benefit of using a passive filter to mitigate order 2 and 4 harmonics in this system is evident, taking into account that the complexity and cost of the project are low, however, the active filter topology is considered as the best result for the correction of current harmonic distortions in this point, the active filter topology was chosen as the best result for distortion correction. current harmonics at this point, as it causes less energy impact on the system.

**Keywords:** Harmonic Distortion, Power Filters, Electric Power Quality, Mitigation, MATLAB®, ATP Draw®.

*“Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que renunciar para conseguir. ”*

*(Dalai Lama)*

Dedico este trabalho ao meu querido marido Alisson Izidoro Angelo, cujo apoio e compreensão foram essenciais para finalizar este trabalho.

E aos meus pais Ana Maria Mendes e Hermes Mendes, pilares da minha formação como ser humano.

Sem eles nada seria possível.  
Gratidão eterna.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, Divino Criador. Eu sinto muito, por favor me perdoe, eu te amo e sou grata.

À minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão durante os períodos mais conturbados desse caminho.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica e Computação, PGEEC, da UNIOESTE, pela abençoada oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao Professor Doutor Oswaldo Hideo Ando Junior e à Professora Doutora Mauren Pomalis Coelho da Silva, por todo apoio e auxílio prestados no decorrer do mestrado e, principalmente, pela atenção dispensada durante a pesquisa.

A todos os professores do programa, pela ajuda dispensada a mim durante a realização do mestrado.

Aos colegas e amigos de mestrado, principalmente à Thayana Knupp Gimenes, por toda ajuda e pelos momentos de risada e descontração proporcionados.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade Energética (GPEnSE), em especial ao colega Marcelo Marcos Amoroso, pela ajuda e pelo conhecimento compartilhado.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.



# Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>17</b>
1.1 Objetivos .....	18
1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa .....	18
1.3 Contribuição da Pesquisa .....	19
1.4 Visão Geral do Trabalho .....	19
<b>2. Referencial Teórico.....</b>	<b>20</b>
2.1 Qualidade de Energia Elétrica.....	20
2.2 Distorções da forma de onda.....	23
2.2.1 Classificação de harmônicas.....	25
2.2.2 Métodos de caracterização de harmônicos .....	27
2.2.3 Índices harmônicos .....	28
2.2.4 Fontes de Harmônicos .....	30
2.2.5 Causa e efeitos das distorções harmônicas .....	31
2.2.6 Mitigação de Harmônicos.....	32
2.3 Filtros de Potência.....	33
2.3.1 Filtros Passivos .....	34
2.3.2 Filtros Ativos .....	37
2.3.3 Filtros Híbridos.....	39
2.3.4 Estado da Arte .....	41
2.4 Normas Regulamentadoras .....	42
2.4.1 PRODIST – Módulo 8.....	42
2.4.2 IEEE 519-2014 .....	45
2.4.3 IEC 61000.....	47
2.4.4 EN 50160:2008.....	49
2.5 Usina Termelétrica .....	50
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>52</b>
3.1 Estudo de Caso – Precipitador Eletrostático .....	54
<b>4. Projeto e Dimensionamento .....</b>	<b>59</b>
4.1 Filtro Passivo.....	59
4.2 Filtro Ativo.....	62
4.2.1 Carga não linear – Precipitador Eletrostático .....	63
4.2.2 Gerador das correntes de referência .....	64
4.2.3 Regulador de tensão no elo CC .....	68

4.2.4	Parâmetros de projeto .....	68
<b>5.</b>	<b>Simulações e Resultados.....</b>	<b>71</b>
5.1	Filtro Passivo.....	71
5.1.1	Filtro de ordem 2 .....	71
5.1.2	Filtro de ordem 4 .....	72
5.1.3	Filtro de ordem 8 .....	73
5.1.4	Filtros de ordem 2 e 4.....	73
5.2	Filtro Ativo.....	76
5.3	Discussão dos resultados .....	78
<b>6.</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>80</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>82</b>
	<b>Apêndice A .....</b>	<b>86</b>
	<b>Apêndice B .....</b>	<b>89</b>
	<b>Apêndice C .....</b>	<b>91</b>
	<b>Apêndice D .....</b>	<b>93</b>
	<b>Apêndice E .....</b>	<b>95</b>
	<b>Apêndice F.....</b>	<b>99</b>
	<b>Apêndice G.....</b>	<b>101</b>
	<b>Apêndice H.....</b>	<b>103</b>
	<b>Apêndice I.....</b>	<b>105</b>
	<b>Apêndice J.....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>109</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>110</b>

# LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Distúrbios comumente encontrados em sistemas elétricos. ....	22
<b>Figura 2.2</b>	Distorção de corrente causada por cargas não lineares. ....	23
<b>Figura 2.3</b>	Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida. ....	24
<b>Figura 2.4</b>	Comparativo entre formas de onda sem e com a presença de harmônicas. ....	25
<b>Figura 2.5</b>	Cadeia de Análise de Fourier. ....	27
<b>Figura 2.6</b>	Circuito elétrico com elementos não lineares. ....	31
<b>Figura 2.7</b>	Resposta em frequência de cada filtro ideal. ....	33
<b>Figura 2.8</b>	Topologia de filtro de potência passivo série. ....	35
<b>Figura 2.9</b>	Filtros de Potência Passivos de Sintonia (a) simples, (b) e (c) dupla. ....	36
<b>Figura 2.10</b>	Filtros de Potência Passivos Amortecidos (a) e (b) de primeira ordem, (c) de segunda ordem, (d) de terceira ordem; (e) filtro do tipo C. ....	37
<b>Figura 2.11</b>	Diagrama básico de um filtro ativo série. ....	38
<b>Figura 2.12</b>	Diagrama básico de um filtro ativo paralelo. ....	39
<b>Figura 2.13</b>	Filtro Híbrido Série. ....	40
<b>Figura 2.14</b>	Filtro Híbrido Paralelo. ....	40
<b>Figura 3.1</b>	Etapas para a elaboração dos filtros de potência. ....	53
<b>Figura 3.2</b>	PCC do precipitador eletrostático (ponto P6). ....	55
<b>Figura 3.3</b>	Forma de onda de tensão (azul) e corrente (vermelho) no ponto PCCA. ....	56
<b>Figura 3.4</b>	Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHli) no PCCA. ....	57
<b>Figura 3.5</b>	Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHli) no PRE_AA. ....	58
<b>Figura 4.1</b>	Filtro de Potência Ativo Paralelo. ....	62
<b>Figura 4.2</b>	Representação das cargas não lineares do precipitador no Simulink®. ....	63
<b>Figura 4.3</b>	Comparação das DHli's do sistema modelado em ATP Draw® (vermelho) e do sistema modelado em Simulink® (roxo). ....	64
<b>Figura 4.4</b>	Forma de onda de tensão (azul) e corrente (vermelho) na fase A do ponto PCC do sistema modelado em Simulink®. ....	64
<b>Figura 4.5</b>	Teoria SRF desenvolvida no Simulink®. ....	66
<b>Figura 4.6</b>	PLL desenvolvido no Simulink®. ....	67
<b>Figura 4.7</b>	Controlador de corrente desenvolvido no Simulink®. ....	67
<b>Figura 5.1</b>	DHli no PCCA com o filtro de ordem 2. ....	71
<b>Figura 5.2</b>	DHli no PCCA com o filtro de ordem 4. ....	72
<b>Figura 5.3</b>	DHli no PCCA com a associação dos filtros de ordem 2 e 4. ....	74
<b>Figura 5.4</b>	Comparação da DHli do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde). ....	74
<b>Figura 5.5</b>	Comparação da forma de onda de corrente no ponto PCCA do sistema original (vermelho) e após a inserção da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde). ....	75
<b>Figura 5.6</b>	Forma de onda e DHli no ponto PRE_AA antes (rosa) e depois da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde). ....	75
<b>Figura 5.7</b>	Comparação da DHli do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção do filtro ativo (verde). ....	76
<b>Figura 5.8</b>	Comparação da forma de onda de corrente no ponto PCCA do sistema original (vermelho) e após a inserção da associação do filtro ativo (verde). ....	77

<b>Figura 5.9</b> Forma de onda e DHli no ponto PRE_AA antes e após a inserção do filtro ativo. ....	77
<b>Figura 5.10</b> Resultados obtidos de DHli no PCC do precipitador eletrostático. ....	78

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> Classificação das harmônicas até a décima segunda ordem. ....	26
<b>Tabela 2.2</b> Resultados das pesquisas realizadas nos bancos de dados escolhidos.....	41
<b>Tabela 2.3</b> Terminologia adotada no PRODIST Módulo 8.....	43
<b>Tabela 2.4</b> Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	44
<b>Tabela 2.5</b> Limites de distorção de corrente recomendados para sistemas com classificação nominal de 120 V até 69 kV.....	45
<b>Tabela 2.6</b> Limites de distorção de corrente para sistemas acima de 69 kV a 161 kV.....	45
<b>Tabela 2.7</b> Limites de distorção de corrente para sistemas com classificação > 161 kV.....	46
<b>Tabela 2.8</b> Limites de distorções harmônicas de tensão.....	46
<b>Tabela 2.9</b> Níveis de compatibilidade para tensões harmônicas individuais em rede de baixa tensão – componentes ímpares. ....	48
<b>Tabela 2.10</b> Níveis de compatibilidade para tensões harmônicas individuais em rede de baixa tensão – componentes pares. ....	48
<b>Tabela 2.11</b> Níveis de compatibilidade de tensões harmônicas - componentes ímpares. ....	49
<b>Tabela 2.12</b> Níveis de compatibilidade de tensões harmônicas - componentes pares.....	49
<b>Tabela 2.13</b> Limite de distorção individual de tensão em rede de distribuição em baixa e média tensão. ....	50
<b>Tabela 3.1</b> Distorções harmônicas individuais em desacordo com a norma IEE 519 -2014. .	57
<b>Tabela 4.1</b> Diferença entre a DHI simulada e a máxima permitida pela IEEE 519 – 2014. .	59
<b>Tabela 4.2</b> Valores de reatância capacitiva e indutiva dos filtros de ordem h.....	61
<b>Tabela 4.3</b> Valores da reatância efetiva na frequência fundamental, capacitor e indutor dos filtros de ordem h.....	61
<b>Tabela 4.4</b> Valores de resistência encontrados para as harmônicas de ordem 2, 4 e 8.....	62
<b>Tabela 4.5</b> Parâmetros utilizados para modelar o filtro ativo paralelo no Simulink®. ....	70
<b>Tabela 5.1</b> Comparação técnica dos filtros passivo e ativo. ....	78
<b>Tabela A.1</b> Portfólio bibliográfico feito a partir do método ProKnow-C para filtros de potência ativos. ....	86
<b>Tabela A.2</b> Portfólio bibliográfico feito a partir do método ProKnow-C para filtros de potência passivos. ....	87
<b>Tabela A.3</b> Portfólio bibliográfico feito a partir do método ProKnow-C para filtros de potência híbridos. ....	88
<b>Tabela B.1</b> Distorção harmônica de tensão encontrada no ponto PCCA. ....	89
<b>Tabela C.1</b> Distorção harmônica de corrente encontrada no ponto PCCA. ....	91
<b>Tabela D.1</b> Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PRE_AA. ....	93
<b>Tabela E.1</b> Corrente da frequência fundamental dos filtros de ordem h. ....	95
<b>Tabela E.2</b> Tensões no capacitor dos filtros de ordem h.....	95
<b>Tabela E.3</b> Potência reativa trifásica real dos filtros de ordem h. ....	96
<b>Tabela E.4</b> Correntes no capacitor dos filtros de ordem h. ....	97
<b>Tabela E.5</b> Resultados do teste de desempenho do filtro – corrente.....	97
<b>Tabela E.6</b> Resultado da avaliação de aquecimento dielétrico do capacitor dos filtros de ordem h. ....	98
<b>Tabela F.1</b> Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com o filtro de ordem 2.....	99

<b>Tabela G.1</b> Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com o filtro de ordem 4. ....	101
<b>Tabela H.1</b> Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com o filtro de ordem 8. ....	103
<b>Tabela I.1</b> Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com os filtros de ordem 2 e 4. ....	105
<b>Tabela J.1</b> Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PRE_AA com os filtros de ordem 2 e 4. ....	107

# Capítulo 1

## 1. Introdução

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) entregue pelas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi um objeto de interesse dos mesmos. Entretanto, até a década de 90, a qualidade da energia era analisada, sobretudo, de acordo com a continuidade dos serviços, ou seja, a principal preocupação, dos consumidores era que não houvesse interrupções no fornecimento de energia elétrica (Mercedes, Rico, & Pozzo, 2015).

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência os equipamentos ligados aos sistemas elétricos evoluíram, melhorando seu rendimento e exigindo assim que a qualidade de energia passasse a ser analisada de forma mais aprofundada e que não fosse apenas uma questão de continuidade. A partir da década de 90 a QEE começou a ser padronizada e algumas normas internacionais foram criadas a respeito disso, entre elas as normas IEEE 519, IEC 61000 e EN 50160. Estas normas abordam diversos distúrbios eletromagnéticos que afetam a QEE, entre eles pode se citar a distorção da forma de onda, que segundo Delmont (2003) é descrita como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental. Os principais tipos de distorção da forma de onda são as harmônicas, inter-harmônicas e sub-harmônicas.

As harmônicas são deformações na forma de onda da tensão ou da corrente causadas pela inserção de dispositivos não lineares na rede elétrica (Delmont, 2003; Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2002). As harmônicas são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, que é a frequência na qual o sistema de energia elétrica opera.

Formas de onda puramente senoidais são almejadas nos sistemas elétricos, visto que os equipamentos são projetados com base em um suprimento senoidal (Leão, Antunes, & Sampaio, 2014), por este motivo e também pelos prejuízos e danos por elas causados, vê-se a necessidade de estudar formas de mitigação das distorções harmônicas.

Existem diversas soluções disponíveis no mercado para mitigar este distúrbio, como por exemplo, o uso de transformadores isoladores, reatores de linha e filtros de potência. A maneira mais comum de mitigar distorções harmônicas é por meio da utilização de filtros (Crepaldi, Amoroso, & Ando Junior, 2018; Leão et al., 2014; Pires, 2010). Os filtros representam a maneira mais adequada para mitigar os distúrbios inseridos na rede elétrica, pois corrigem as alterações dos módulos da corrente e tensão nas diversas frequências harmônicas, promovendo uma maior e melhor aproximação da característica senoidal da tensão elétrica, de acordo com

as formas de onda encontradas no sistema elétrico.

Os filtros de potência são classificados quanto à sua construção em três topologias distintas: ativos, passivos e híbridos. Cada topologia apresenta vantagens e desvantagens, e não existe uma solução genérica que possa ser aplicada em qualquer caso, em se tratando de mitigação de harmônicas. Cada sistema elétrico é único e necessita ser analisado de forma criteriosa para que seja possível encontrar uma solução adequada e pensada única e exclusivamente para aquele sistema.

Diante da problemática, a presente pesquisa propõe uma análise comparativa do desempenho de filtros de potência para mitigação de distorção harmônica encontrada num Sistema Elétrico de Potência (SEP) real, mais precisamente em um precipitador eletrostático presente nos serviços auxiliares de uma UTE. Com esta análise comparativa é possível propor a melhor solução para tratar um problema real em que haja prejuízos devido às harmônicas.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é analisar e comparar o desempenho de duas topologias de filtros de potência utilizadas para mitigar distorções da forma de onda (harmônicas de sequência positiva e negativa) contidas nos serviços auxiliares de uma usina termelétrica, que estejam em desacordo com as exigências da norma IEEE-519-2014. O foco da análise são os sistemas auxiliares no ponto comum de conexão (PCC) junto ao precipitador eletrostático de uma UTE. Para isso, tem-se os seguintes objetivos específicos este trabalho:

1. Modelar em ATP Draw® e Simulink® a rede secundária de energia elétrica simplificada, objeto de análise;
2. Projetar e dimensionar filtros de potência passivo e ativo para mitigar as distorções harmônicas de sequência positiva e negativa no PCC do precipitador;
3. Modelar e simular a inserção dos filtros desenvolvidos na rede secundária. O filtro passivo será calculado por uma rotina no MATLAB® e implementado em ATP Draw®, enquanto o filtro ativo será implementado no MATLAB®, utilizando a ferramenta Simulink®;
4. Analisar comparativamente o desempenho dos filtros de potência no PCC a partir dos resultados obtidos e identificar qual a melhor solução de acordo com a capacidade de mitigação.

## 1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa

A motivação desta pesquisa vem do interesse em se aprofundar no assunto de QEE e suas respectivas técnicas de mitigação dos distúrbios eletromagnéticos classificados na IEEE1159,

em especial as distorções harmônicas.

Os distúrbios eletromagnéticos permeiam por todos os âmbitos do setor elétrico, desde a geração até o consumidor final e acarretam muitas desvantagens a curto e longo prazo. A curto prazo podem causar sobrecarga, vibrações e alterações do fator de potência. A longo prazo podem causar envelhecimento precoce de cabos, componentes eletrônicos e, devido à grande presença de distorções harmônicas nas unidades geradoras, que influenciam na operação dos serviços auxiliares, em casos críticos, causar a parada da unidade, devido a disparos intempestivos ou falha da proteção (Pomalis, 2014).

Fatos como estes evidenciam a relevância do estudo aplicado da QEE e a constante busca por métodos de mitigação dos distúrbios e conseqüentemente a mitigação das perdas de energia.

### **1.3 Contribuição da Pesquisa**

Esta pesquisa visa analisar e comparar o desempenho de filtros de potência a fim de mitigar distúrbios da forma de onda de corrente, no precipitador eletrostático de uma UTE. A correção destes distúrbios nos serviços auxiliares visa aumentar a qualidade e confiabilidade da energia elétrica a ser distribuída, bem como reduzir possíveis prejuízos econômicos oriundos dos efeitos dos distúrbios nos equipamentos ali presentes, e perdas para a concessionária geradora de energia.

### **1.4 Visão Geral do Trabalho**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No Capítulo 1 é feita a introdução do assunto abordado ao longo do trabalho apontando quais os objetivos a serem alcançados, bem como a motivação para a realização do mesmo. O Capítulo 2 traz o referencial teórico, tratando sobre qualidade de energia elétrica, distúrbios eletromagnéticos, filtros de potência e normas regulamentadoras. No Capítulo 3 é apresentada e definida a metodologia e o estudo de caso propostos para a pesquisa. No Capítulo 4 são apresentados os cálculos utilizados para dimensionar os filtros escolhidos. O Capítulo 5 é destinado para mostrar as simulações e resultados obtidos através do sistema modelado. No Capítulo 6 será exposta a conclusão obtida a partir da pesquisa bem como sugestões de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## 2. Referencial Teórico

Neste capítulo serão abordados conceitos e definições de qualidade de energia elétrica, distorções harmônicas e filtros de potência. É trazido também o estado da arte de filtros de potência e uma síntese sobre as normas regulamentadoras que abordam o assunto de distúrbios eletromagnéticos.

### 2.1 Qualidade de Energia Elétrica

O significado da palavra qualidade é muito subjetivo e está inteiramente relacionado com a percepção e a necessidade de cada um. No setor elétrico não é diferente, QEE depende de como esta energia será utilizada e o que será afetado com as mais variadas características da energia, bem como o seu uso.

A QEE tem mais de uma definição para descrever o mesmo conjunto de fenômenos que afetam a amplitude e a forma de onda de tensão e de corrente, e está diretamente relacionada à manutenção da tensão de fornecimento próxima às suas condições ideais (Ando Junior, 2009).

Pode-se definir a QEE como sendo a qualidade de tensão de fornecimento, e uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores e inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para uma operação segura. Entre os parâmetros a considerar, tem-se: distorções da forma de onda, flutuações de tensão, variações de tensão de curta duração, desequilíbrios de sistemas trifásicos e transitórios rápidos (Deckmann & Pomilio, 2018).

O aumento da preocupação com a QEE é decorrente da reestruturação que o setor elétrico vem experimentando ao longo das décadas. No final da década de 70 os hábitos de consumo da energia elétrica eram diferentes dos hábitos atuais, podiam-se dividir os consumidores em classe residencial, comercial e industrial. Cada classe apresentava uma demanda característica de consumo de energia. A demanda da energia elétrica residencial era consumida por uma carga predominantemente resistiva (Ando Junior, 2009; Deckmann & Pomilio, 2018).

Atualmente a divisão das classes de consumidores não faz tanta distinção entre as

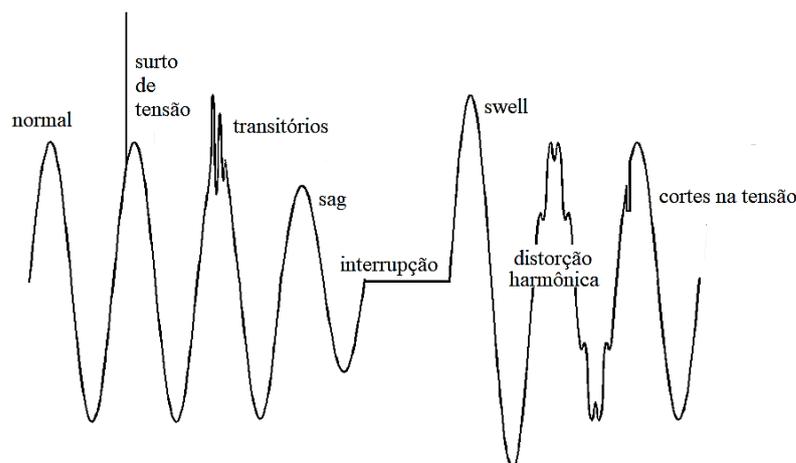
demandas utilizadas, visto que “encontram-se consumidores em todas as classes de consumo com inúmeras cargas comandadas eletronicamente” (Ando Junior, 2009). Com a inserção de cargas não lineares no sistema, aumentou-se a introdução de distúrbios na rede. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência os equipamentos ligados aos sistemas elétricos evoluíram, melhorando seu rendimento e exigindo, assim, que a qualidade de energia passasse a ser analisada de forma mais aprofundada.

Segundo Deckmann & Pomilio (2018), a reformulação pela qual o setor elétrico vem passando, visa viabilizar a implantação de um mercado consumidor, no qual o produto comercializado seja a própria energia elétrica. O consumidor visa adquirir a energia que apresenta parâmetros adequados de qualidade com menor custo possível. Nesse contexto, as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas, tanto pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como pelo próprio mercado, a prestar informações sobre as condições de operação ou fornecer detalhes sobre eventos ocorridos que afetaram diretamente os consumidores.

Ao longo dos anos, tornou-se comum incluir cláusulas contratuais sobre as condições de fornecimento de energia pelos agentes fornecedores (gerador, transmissor, distribuidor) aos agentes compradores (distribuidor, consumidor final), essas cláusulas podiam prever multas por violação das condições previstas e com isso se fez necessário padronizar normas com limites adequados para atender sem prejuízos tanto o fornecedor quanto o consumidor (Deckmann & Pomilio, 2018).

A partir da década de 90 a QEE começou a ser padronizada e algumas normas internacionais foram criadas a respeito disso, entre elas as normas IEEE 519, IEEE 1159, EN 50160 e IEC 61000. As normas criadas visam basicamente definir limites aceitáveis para as anomalias que ocorrem na rede elétrica visto que, é impossível extingui-las por completo.

Segundo Pimentel & Wazen (2016), os distúrbios elétricos afetam milhões de consumidores e eles têm várias causas e origens, mas certamente muitos deles são gerados no próprio consumidor ou nas suas adjacências. A Figura 2.1 ilustra, a partir de diferentes formas de onda, alguns distúrbios que geralmente são encontradas nos sistemas elétricos, os quais afetam a QEE.



**Figura 2.1** Distúrbios comumente encontrados em sistemas elétricos.

Fonte: Adaptado de Pimentel & Wazen, 2016.

Os distúrbios que afetam a QEE podem ser gerados tanto nos sistemas das concessionárias quanto em seus equipamentos, bem como nos equipamentos dos consumidores (Ando Junior, 2009). Conforme a Norma do IEEE 1159, os fenômenos eletromagnéticos associados a QEE são divididos em sete categorias como mostra o ANEXO A, essa divisão é feita de acordo com as características típicas de cada fenômeno e pode ser resumida em (IEEE 1159, 2009):

- Transitórios – são provenientes de variações súbitas do valor instantâneo da tensão do sistema de energia elétrica, possuem altas frequências em seu espectro e curta duração. Esses fenômenos podem ainda ser divididos em transitórios impulsivos e oscilatórios (Ando Junior, 2009);
- Variação de tensão de curta duração – apresentam um desvio do valor da tensão eficaz em um curto intervalo de tempo (entre 0,5 ciclos até 1 minuto) e podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias (IEEE 1159, 2009);
- Variação de tensão de longa duração – apresentam um desvio do valor da tensão eficaz em um intervalo de tempo superior a 1 minuto, e podem ser divididos em interrupções sustentadas, subtensões e sobretensões (IEEE 1159, 2009);
- Desbalanceamento – a análise desse fenômeno considera quanto a tensão de sequência negativa se altera em relação a sequência positiva. O desbalanceamento de tensão para estado estável varia de 0,5 a 2% enquanto para corrente é possível variar de 1% até 30% (IEEE 1159, 2009);
- Distorções na forma de onda – é uma variação da forma de onda senoidal de tensão ou corrente, na frequência fundamental, em regime permanente (Ando Junior, 2009). As distorções foram subclassificadas de acordo com sua frequência e alteração de magnitudes do sinal em: nível CC (deslocamento contínuo), harmônicas, interharmônicas, notching e ruído (IEEE 1159, 2009);

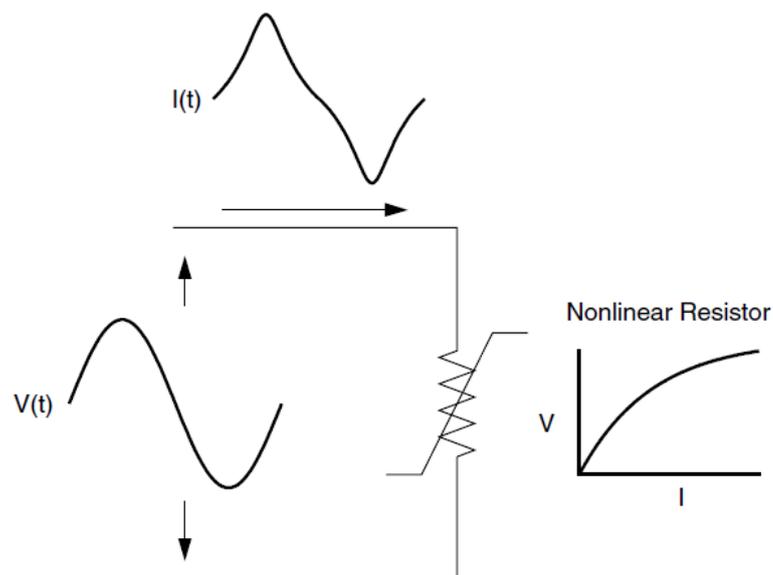
- Flutuação ou oscilação de tensão – são oscilações randômicas ou variações sistemáticas e intermitentes das tensões eficazes que alteram a magnitude da tensão, sendo que essa mudança, normalmente, permanece entre 0,95 e 1,05 pu (IEEE 1159, 2009);
- Variação de frequência – são desvios no valor nominal da frequência fundamental de um sistema elétrico. Este fenômeno é causado pela variação de velocidade do gerador proveniente do desequilíbrio entre a potência gerada e a solicitada pela carga (Ando Junior, 2009).

Dos distúrbios eletromagnéticos encontrados no sistema elétrico, a categoria que mais se sobressai, devido à sua enorme presença, são as distorções na forma de onda, mais precisamente as distorções harmônicas, objeto de interesse e estudo desta dissertação.

## 2.2 Distorções da forma de onda

A presença de distorções harmônicas em um sinal elétrico não é um fenômeno novo. A preocupação com a distorção harmônica surgiu durante o início da história dos sistemas de potência em corrente alternada (Leão et al., 2014). A distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares no sistema de energia. Um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada (Dugan et al., 2002).

A Figura 2.2 ilustra o conceito de distorção de corrente quando uma tensão senoidal é aplicada a um resistor não linear simples.



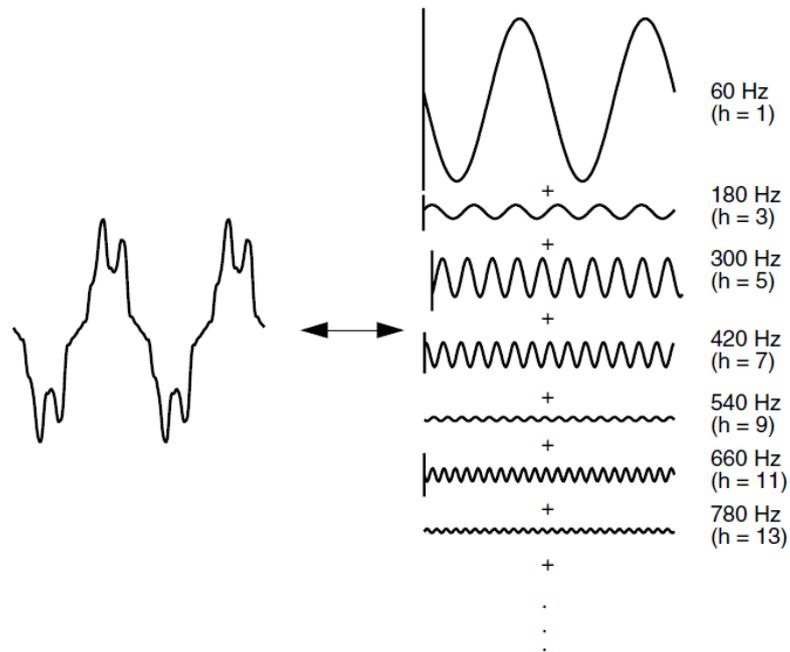
**Figura 2.2** Distorção de corrente causada por cargas não lineares.

Fonte: (Dugan et al., 2002).

Enquanto a tensão aplicada na entrada do circuito é perfeitamente senoidal, a corrente

resultante é distorcida.

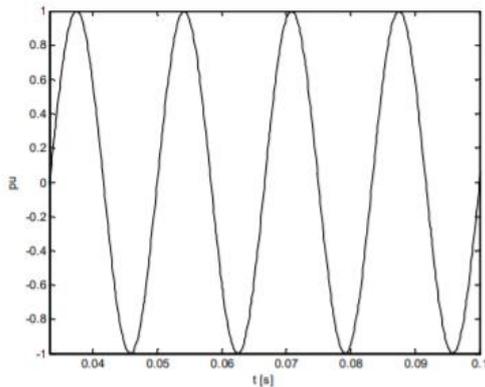
Uma forma de onda periódica distorcida é o resultado da sobreposição de uma série de ondas senoidais, que possui uma componente fundamental e um conjunto de ondas denominadas harmônicas, responsáveis pelo maior ou menor grau de distorção da onda. Qualquer forma de onda periódica distorcida pode ser expressa como uma soma de senoides, como pode ser visto na Figura 2.3.



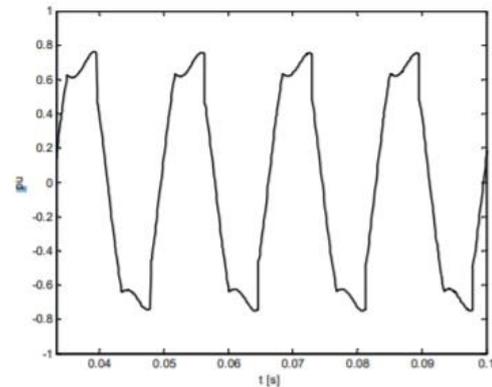
**Figura 2.3** Representação em série de Fourier de uma forma de onda distorcida.

Fonte: (Dugan et al., 2002).

A menor frequência de ordem inteira determina a frequência de oscilação da onda distorcida, esta frequência é conhecida como frequência fundamental. Cada múltiplo inteiro da fundamental, cuja ordem é igual a 1, define a ordem da harmônica (Leão et al., 2014). Na Figura 2.3 a frequência fundamental é de 60 Hz e a harmônica de 13ª ordem corresponde a 780 Hz. A distorção na forma de onda causada pela inserção de harmônica no sistema é ilustrada na Figura 2.4.



(a) Forma de onda senoidal e periódica



(b) Forma de onda submetida a distorções harmônicas

**Figura 2.4** Comparativo entre formas de onda sem e com a presença de harmônicas.

Fonte: (Freitas, 2011).

Em um sistema elétrico ainda podem ser encontradas distorções nomeadas de inter-harmônicas e sub-harmônicas. Os sinais com frequências que estão situadas entre as múltiplas inteiras da fundamental são denominados “inter-harmônicas”, ou seja, são sinais que apresentam frequências não múltiplas inteiras da frequência fundamental. Os sinais com frequências abaixo da frequência fundamental são denominados “sub-harmônicas” (Leão et al., 2014). As sub-harmônicas são casos particulares das inter-harmônicas, e por este motivo nem todas as bibliografias as mencionam.

### 2.2.1 Classificação de harmônicas

As harmônicas podem ser classificadas quanto a sua ordem, a frequência e sequência. A ordem está relacionada ao valor do múltiplo da frequência fundamental, enquanto a sequência pode ser positiva, negativa ou nula.

Cada harmônica possui um nome (ordem), uma frequência e uma sequência como demonstrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Classificação das harmônicas até a décima segunda ordem.

Nome/Ordem	Frequência	Sequência
1 <sup>a</sup>	60	+
2 <sup>a</sup>	120	-
3 <sup>a</sup>	180	0
4 <sup>a</sup>	240	+
5 <sup>a</sup>	300	-
6 <sup>a</sup>	360	0
7 <sup>a</sup>	420	+
8 <sup>a</sup>	480	-
9 <sup>a</sup>	540	0
10 <sup>a</sup>	600	+
11 <sup>a</sup>	660	-
12 <sup>a</sup>	720	0

Fonte: Adaptado de (Pomalis, 2014).

A sequência refere-se à rotação física com relação à frequência fundamental ela pode ser positiva, negativa ou zero. Na harmônica de sequência positiva o conjunto contém três sinusoides deslocados 120° um do outro, com o a rotação normal da fase A-B-C (por exemplo, 0°, -120°, 120°). Nas harmônicas de sequência negativa as fases também são deslocadas em 120° entre si, mas tem uma rotação de fase (A-C-B, por exemplo, 0°, 120°, -120°). As harmônicas de sequência zero estão em fase entre si (por exemplo, 0°, 0°, 0°) (Dugan et al., 2002).

Em um motor de indução, uma harmônica de sequência negativa geraria um campo magnético que gira em direção oposta ao campo magnético gerado pela frequência fundamental. Uma harmônica de sequência positiva geraria um campo magnético no mesmo sentido que a frequência fundamental.

As harmônicas de sequência zero, são as harmônicas ímpares múltiplas de 3, também chamadas de *triplens*. Essas harmônicas merecem destaque especial pois a resposta do sistema perante esse tipo de harmônica é consideravelmente diferente do que para o resto das harmônicas. Elas se tornam um importante problema para sistemas de aterramento com corrente fluindo no neutro.

Segundo Freitas (2011), alguns problemas são frequentemente ocasionados pelas distorções harmônicas de sequência zero (*triplens*), dentre eles pode-se citar o sobreaquecimento do condutor neutro, interferências em sistemas de telecomunicação, diferenças de potenciais entre terra e neutro, etc.

## 2.2.2 Métodos de caracterização de harmônicos

Para identificar as componentes harmônicas presentes em uma onda não senoidal, utiliza-se a análise de Fourier. A frequência, amplitude e fase de cada senoide são determinadas por meio dessa análise. A análise de Fourier permite realizar o processo de conversão de formas de onda no domínio do tempo em suas componentes de frequência (Leão et al., 2014).

Fourier postulou que qualquer função contínua periódica em um intervalo  $T$  pode ser representado pelo somatório de um componente contínuo, um componente sinusoidal fundamental e uma série de componentes sinusoidais de ordem superior em frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental (Arrillaga & Watson, 2003). A análise de harmônicas consiste em um processo de calcular as magnitudes e fases da frequência fundamental e suas harmônicas.

Dentre os métodos disponíveis para analisar as distorções harmônicas pode-se citar:

- **Série de Fourier** – estabelece uma relação simples entre uma função contínua no domínio do tempo com uma função discreta no domínio da frequência (James, 2011 apud Leão et al., 2014). Séries de Fourier são, basicamente, uma forma de representar funções infinitas e periódicas como séries infinitas de senos e cossenos;
- **Transformada de Fourier** – permite mapear sinais aperiódicos no tempo para o domínio da frequência, resultando em um aspecto contínuo (Arrillaga & Watson, 2003). A Transformada de Fourier decompõe um sinal em suas componentes elementares seno e cosseno.

A análise de Fourier possui várias vertentes, sendo dividida em diferentes funções. A Figura 2.5 ilustra as vertentes possíveis de serem utilizadas para uma análise completa de distorções harmônicas.



**Figura 2.5** Cadeia de Análise de Fourier.

Fonte: Adaptado de (Leão et al., 2014).

Além dos métodos supracitados, utiliza-se o método da Transformada de *Wavelet* (TW) para a análise de distorções harmônicas. Ela é amplamente utilizada quando as frequências variam em seu espectro pois, ela tem como característica principal a flexibilidade de janela

(Arrillaga & Watson, 2003). A TW é apropriada para análise temporal e espacial de sinais não estacionários.

*Wavelets* são funções matemáticas que decompõem sinais em diferentes componentes de frequências, posteriormente cada componente é avaliado com uma resolução correspondente à sua escala (Leão et al., 2014). Existe um grande número de Transformadas *Wavelet*, cada uma adequada a diferentes aplicações; as mais comuns são:

- Transformada *Wavelet* contínua;
- Transformada *Wavelet* discreta;
- Transformada *Wavelet* rápida;
- Transformada *Wavelet* estacionaria;
- Transformada *Wavelet* de pacote.

A transformada de Fourier ainda é a ferramenta de processamento de sinais mais utilizada nas análises de distorções harmônicas. Para otimizar o uso computacional utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier (Arrillaga & Watson, 2003; Leão et al., 2014).

### 2.2.3 Índices harmônicos

Os dois índices mais usados para medir o conteúdo harmônico de uma forma de onda são a distorção harmônica total (DHT) e a taxa de distorção de demanda (TDD). Ambas são medidas do valor efetivo de uma forma de onda e podem ser aplicadas à tensão ou corrente (Dugan et al., 2002).

**Distorção harmônica total** – o desvio total de uma onda distorcida em relação à sua componente fundamental pode ser estimado com a ajuda do indicador DHT. Ele é um dos índices mais utilizados para indicar o conteúdo harmônico em um sinal (IEEE, 2014).

DHT é a medida do grau de distorção de uma onda em relação a uma senoide pura, sendo seu valor nulo quando o sinal não apresenta componentes harmônicas (Leão et al., 2014). A distorção harmônica total para tensão pode ser definida como mostra a equação (2.1):

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

Onde,

$V_1$  - representa a componente fundamental do sinal (pico ou rms);

$V_h$  - representa a componente harmônica de ordem h (pico ou rms).

A tensão rms expressa em função da  $DHT_V$  é definida como:

$$V_{rms} = \sqrt{V_{rms,1}^2 (1 + DHT_V^2)} \quad (2.2)$$

De modo análogo tem-se a expressão de cálculo para a distorção harmônica total para a corrente  $DHT_I$ :

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} \quad (2.3)$$

A corrente rms expressa em função da  $DHT_I$  é definida como:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{rms,1}^2 (1 + DHT_I^2)} \quad (2.4)$$

**Taxa de distorção da demanda** – avalia o nível de injeção de correntes harmônicas. A TDD é expressa como um percentual da média dos últimos doze meses da demanda máxima mensal da corrente fundamental. A demanda da corrente fundamental é medida em intervalos de 15 a 30 minutos (Leão et al., 2014). A TDD mede o conteúdo harmônico na forma de onda da corrente pela seguinte equação:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_L} \quad (2.5)$$

Quando o valor de  $I_L$  não for conhecido, a TDD pode ser estimada a partir da corrente de plena carga do transformador como uma aproximação da corrente de demanda máxima. E, ainda, a capacidade do condutor da instalação pode ser usada para essa estimativa (Leão et al., 2014).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} \times \frac{I_1}{I_L} \quad (2.6)$$

**Distorção harmônica individual** – expressa o nível individual de uma das componentes harmônicas que totalizam o espectro de frequências de um sinal distorcido, comumente referenciada ao valor da componente fundamental. A distorção harmônica individual de tensão pode ser definida como mostra a equação (2.7):

$$DHI_V\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.7)$$

De modo análogo tem-se a expressão de cálculo para a distorção harmônica individual de corrente  $DHI_I$ :

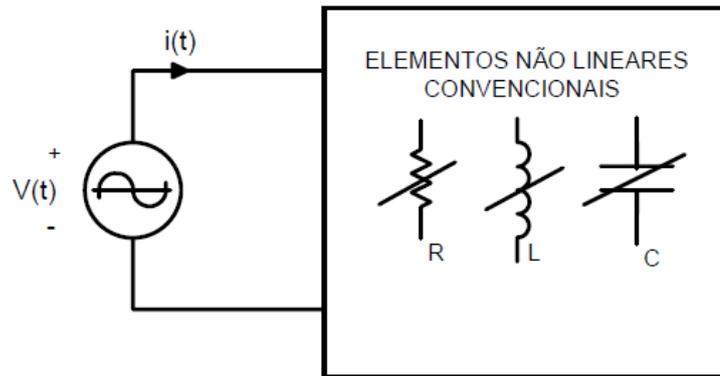
$$DHI_I\% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (2.8)$$

Além da DHT, DHI e da TTD alguns outros parâmetros são importantes para a análise de um circuito, são eles:

- Potência instantânea;
- Potência ativa;
- Potência reativa;
- Potência aparente;
- Potência não ativa;
- Fator de potência;
- Fator de deslocamento;
- Fator de ondulação.

#### **2.2.4 Fontes de Harmônicos**

A distorção harmônica é causada por cargas não-lineares presentes em um sistema de potência (Dugan et al., 2002; Kassick, 2008). A corrente que circula pelas cargas não lineares não é diretamente proporcional à tensão fornecida (Leão et al., 2014). Sendo assim, para uma tensão senoidal aplicada a um elemento não linear simples, onde há variação de tensão e corrente, enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante será distorcida (Dugan et al., 2002). A Figura 2.6 ilustra um circuito elétrico com componentes não lineares.



**Figura 2.6** Circuito elétrico com elementos não lineares.

Fonte: (Kassick, 2008).

As cargas não lineares podem ser divididas em:

- **Convencionais** - As cargas não lineares convencionais são caracterizadas pela ausência de interruptores estáticos e pela presença de distorções harmônicas (Kassick, 2008; Leão et al., 2014). Exemplos: transformadores, máquinas elétricas, reatores de núcleo ferromagnético e fornos elétricos a arco.
- **Chaveadas** - As cargas não lineares chaveadas são caracterizadas pela presença de interruptores estáticos não controlados (diodos) ou controlados (transistor TJB ou MOSFET; Tiristores GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*), MCT (*MOS Controlled Thyristor*) ou IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristor*) (Kassick, 2008; Leão et al., 2014).

### 2.2.5 Causa e efeitos das distorções harmônicas

Diversos danos podem ocorrer pela presença de harmônicas em um sistema elétrico, e, em muitos casos, esses danos podem ser irreversíveis. Segundo Kassick, 2008; Leão et al., 2014, os danos causados pela presença de componentes harmônicos em um sistema poder ser do tipo:

- Baixo fator de potência;
- As correntes no neutro podem ser iguais ou maiores que as correntes de fase;
- Sobreaquecimento de transformadores e motores;
- Atuação intempestiva de dispositivos de proteção (disjuntores, chaves seccionadores) sem causa detectável;
- Avaria de capacitores de correção do fator de potência;
- Aumento de tensões neutro-terra
- Aumento da temperatura nos condutores, devido ao aumento da corrente eficaz e

aumento das perdas Joule;

- Aumento de vibração;
- Ruído audível ( $\cong 3\text{kHz}$ );
- Capacidade de ruptura de disjuntores;
- Influência nas reatâncias indutivas e capacitivas;
- Dispositivos de medição exibem diferentes respostas a sinais não lineares;
- Queima de fusíveis sem sobrecarga aparente;
- Queima de motores de indução;
- Interferência nos sistemas telefônicos e de comunicação;
- Flutuação da imagem em vídeos.

Os efeitos podem ser de dois tipos:

- **Imediatos** – disparos intempestivos de dispositivos de proteção, queima de fusíveis, flutuação de imagem, etc.
- **De longo prazo** – aquecimento de capacitores, cabos, transformadores, geradores e motores, aumento da vibração, inserção de ruído audível, etc.

### 2.2.6 Mitigação de Harmônicos

A distorção harmônica está presente em todos os sistemas de potência, seja em maior ou menor quantidade. Geralmente, a preocupação com a mitigação de distorções harmônicas aparece apenas quando esta ultrapassa os limites estabelecidos pelas normas vigentes e se tornam um problema real, com danos reais.

O momento ideal para analisar estratégias e métodos de mitigação de distorções harmônicas é na etapa de projeto de novas instalações elétricas, ou até mesmo na etapa de compra de novos equipamentos (Leão et al., 2014).

Existem várias soluções disponíveis no mercado para a mitigação destes distúrbios, entretanto, não existe uma solução geral que possa ser aplicada em qualquer caso. Cada sistema elétrico é único e necessita de uma solução adequada e pensada única e exclusivamente para aquele sistema. Segundo Leão et al., 2014, as opções comumente utilizadas são:

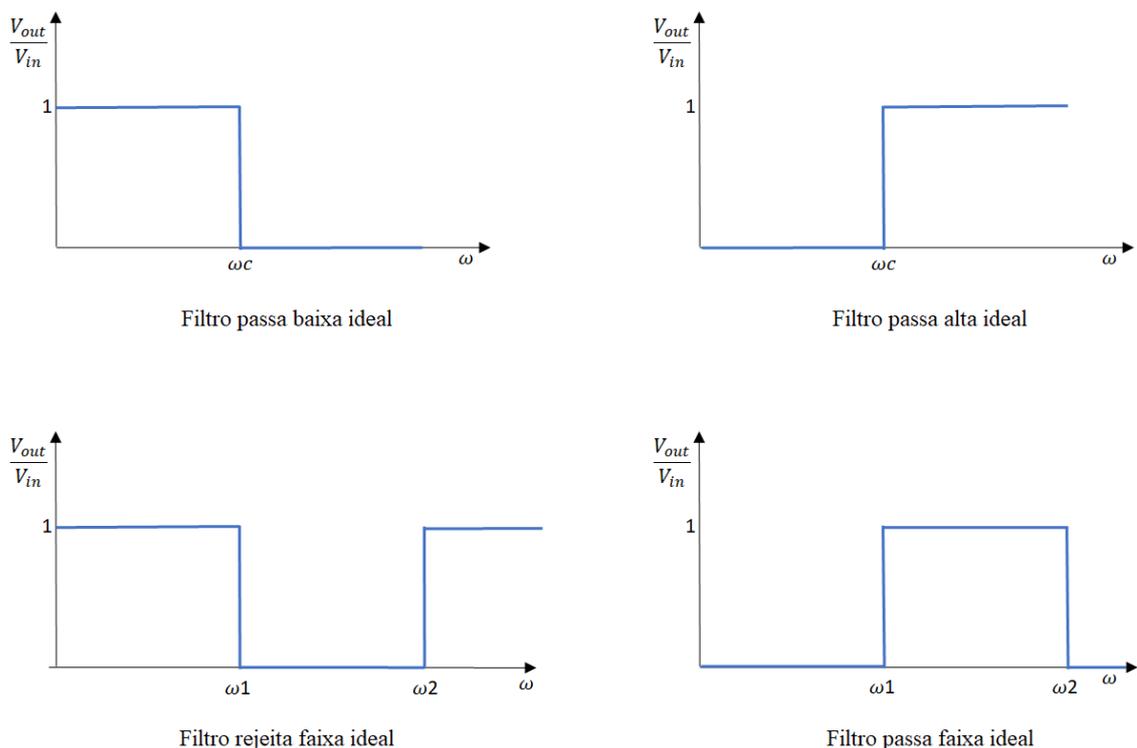
- Reduzir ou eliminar as correntes harmônicas em equipamentos nos sistemas de potência, em especial nos geradores, transformadores, capacitores e conversores de potência;
- Modificar a resposta em frequência do sistema; e
- Adicionar filtros para drenar as correntes harmônicas, retirando-as do sistema.

Os métodos mais conceituados e utilizados são o transformador isolador, reatores de linha, filtros de potência ativos, passivos e híbridos. Cada método possui uma aplicação específica, sendo compostos por tecnologias diferentes, o que faz com que cada um tenha uma vantagem/desvantagem de acordo com a característica do distúrbio encontrado no sistema. Para este trabalho, será estudada a inserção de filtros de potência em um sistema elétrico.

## 2.3 Filtros de Potência

Os filtros de potência apresentam excelente eficácia para mitigar os distúrbios inseridos na rede elétrica, pois corrigem as alterações dos módulos das correntes e tensões nas diversas frequências harmônicas, promovendo uma maior e melhor aproximação da característica senoidal da tensão elétrica, de acordo as formas de onda encontradas (Leão et al., 2014).

Os filtros são utilizados para restringir ou tolerar a passagem de determinados sinais de frequências ou faixas de frequências pré-determinadas e podem ser classificados como: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa. A resposta ideal de cada filtro pode ser observada na Figura 2.7.



**Figura 2.7** Resposta em frequência de cada filtro ideal.

Fonte: Adaptado de (Leão et al., 2014).

A resposta ideal do filtro passa-baixa demonstra que ele permite a passagem de sinais (banda de passagem) até uma frequência limite, denominada frequência de corte ( $\omega_c$ ), acima da qual os sinais de frequências são atenuados (banda de rejeição), este tipo de filtro é utilizado

em aplicações que requerem a rejeição de altas frequências. O passa-alta rejeita sinais abaixo da frequência de corte e são usados em aplicações que requerem a rejeição de baixas frequências (Leão et al., 2014).

Os filtros passa-faixa e rejeita-faixa apresentam duas frequências de corte, inferior ( $\omega_1$ ) e superior ( $\omega_2$ ). O passa-faixa é sintonizado para uma frequência e permite a passagem de uma faixa de frequências compreendida entre as de corte inferior e superior, enquanto o rejeita-faixa, permite a passagem de sinais apenas fora da faixa de frequências intermediárias (Leão et al., 2014).

Além da classificação quanto a resposta em frequência, os filtros de potência podem também ser classificados quanto à sua construção e são divididos em: passivos, ativos e híbridos.

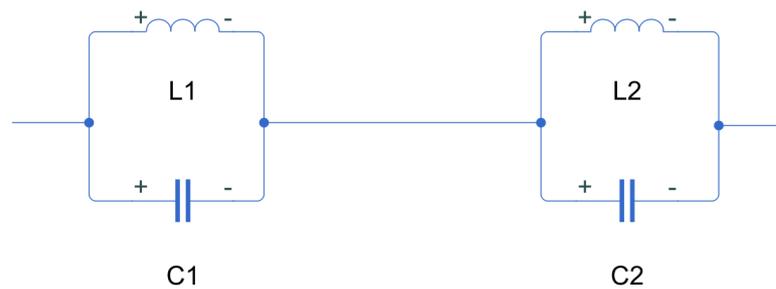
- **Passivos** – constituídos de elementos passivos (resistores, capacitores e indutores);
- **Ativos** – constituídos de elementos passivos e ativos (resistores, capacitores, indutores e amplificadores operacionais);
- **Híbridos** – constituídos pela junção dos filtros passivos e dos filtros ativos.

### 2.3.1 Filtros Passivos

Os filtros de potência passivos (FPP) são equipamentos robustos constituídos apenas por elementos passivos, ou seja, componentes que não requerem uma fonte de energia para desempenhar suas funções, a partir da associação de elementos resistivos (R), indutivos (L) e capacitivos (C), em combinações variadas para a formação de diversas topologias.

Os filtros passivos são circuitos capazes de separar sinais elétricos de corrente, alterando as características de amplitude e fase desses sinais, com o propósito de reduzir a distorção das ondas de tensão e corrente produzidas pelos componentes não lineares da rede elétrica (Dugan et al., 2002; Nascimento, 2007).

Os FPP podem ser classificados quanto ao modo de conexão à rede elétrica série ou em derivação (paralelo/*shunt*). O FPP série é ligado em série com a carga, proporcionando um caminho de alta impedância para a corrente harmônica na frequência sintonizada. A topologia do FPP série pode ser observada na Figura 2.8.



**Figura 2.8** Topologia de filtro de potência passivo série.

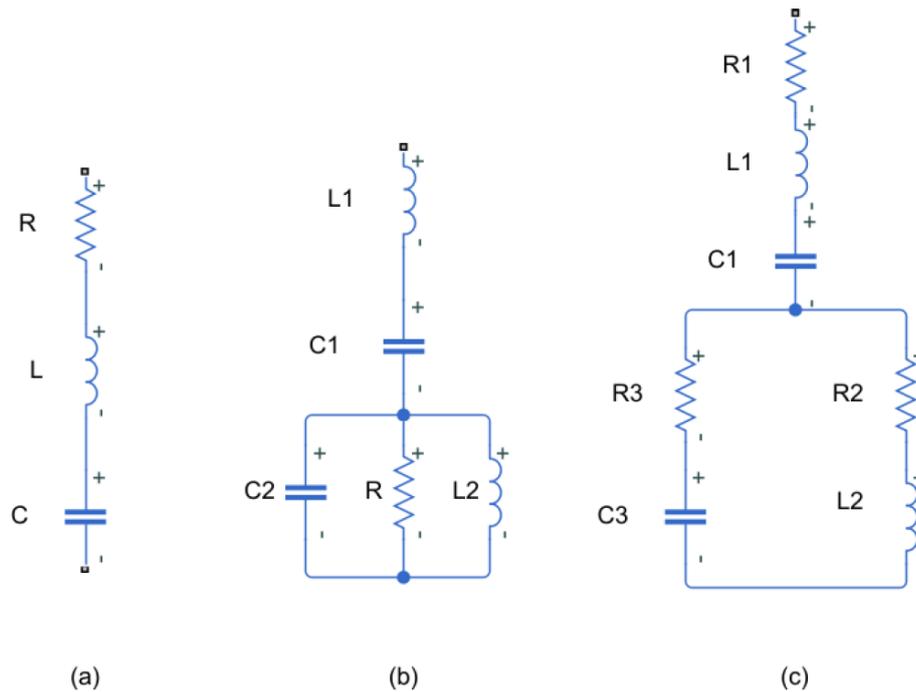
Fonte: Adaptado de (Leão et al., 2014).

O FPP série atua como um circuito de bloqueio para uma frequência ou faixa de frequência específica. Este tipo de filtro é formado por uma indutância e uma capacitância em paralelo, com ação semelhante a uma bobina de bloqueio. Essa topologia não é muito utilizada pois é uma solução de custo elevado e pode causar queda de tensão na carga (Crepaldi et al., 2018; Leão et al., 2014; Nassif & Xu, 2007).

A solução mais usual para mitigar correntes harmônicas consiste na utilização dos FPP em paralelo (*shunt*). Os FPP shunt são aqueles que são instalados nos barramentos, em paralelo com o sistema. Este tipo de topologia oferece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, evitando assim que as mesmas penetrem em determinadas partes do sistema (Diniz, 2014; Dugan et al., 2002; Leão et al., 2014).

O FPP shunt visa desviar parte da corrente harmônica da carga para o filtro, reduzindo assim a distorção que flui pela rede elétrica e podem ser agrupados em duas categorias: sintonizados e amortecidos.

Os filtros sintonizados ou shunt ressonantes são circuitos ressonantes formados por elementos R, L e C em série ou combinações série-paralela destes elementos de circuito. Diz-se que um filtro shunt está sintonizado na frequência que torna sua reatância indutiva e capacitiva iguais (Arrillaga & Watson, 2003). Na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva. Para frequências abaixo da de ressonância se comportam como circuitos capacitivos. Portanto, para a frequência fundamental estes filtros podem funcionar como compensadores de potência reativa (Leão et al., 2014; Nascimento, 2007). A Figura 2.9 ilustra as configurações de FPP típicos de sintonia simples e de dupla sintonia.



**Figura 2.9** Filtros de Potência Passivos de Sintonia (a) simples, (b) e (c) dupla.

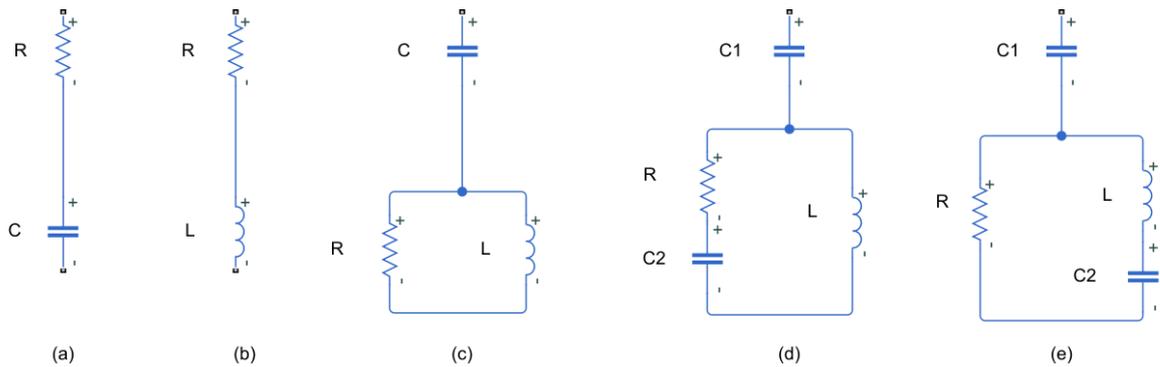
Fonte: Adaptado de (Leão et al., 2014).

Os filtros de sintonia simples são passa-faixa, cuja impedância é baixa na frequência de ressonância e realiza uma filtragem eficiente em uma faixa de frequência estreita em torno da frequência ressonante ou de sintonia. Eles têm um projeto mais simples e são comercialmente mais utilizados para a eliminação de harmônicas específicas. Na frequência de sintonia o filtro passa-faixa apresenta impedância puramente resistiva e na frequência fundamental a impedância do filtro é capacitiva (Leão et al., 2014; Nascimento, 2007).

O filtro de dupla sintonia tem o mesmo funcionamento que os filtros de sintonia simples, porém é sintonizado para duas frequências. Nas frequências de sintonia a impedância do filtro é baixa e nas demais frequências a impedância é alta. Este tipo de filtro apresenta melhor custo benefício e quando arranjados em cascatas tornam-se filtros sintonizados de três frequências (Leão et al., 2014).

Os filtros sintonizados são utilizados na filtragem de harmônicas com as maiores amplitudes no espectro, o que geralmente corresponde às harmônicas de baixa ordem. Apesar de serem muito utilizados este tipo de filtro apresenta algumas desvantagens: contribui com potência reativa para a rede na frequência fundamental e insere um alto valor de ressonância paralela com a rede em frequência abaixo da sintonia (Leão et al., 2014).

Os filtros **amortecidos** são circuitos capacitivos na frequência fundamental, como os filtros sintonizados, e apresentam baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, a partir da frequência de corte e podem ser de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem, como ilustrado na Figura 2.10 (Diniz, 2014; Leão et al., 2014; Nascimento, 2007).



**Figura 2.10** Filtros de Potência Passivos Amortecidos (a) e (b) de primeira ordem, (c) de segunda ordem, (d) de terceira ordem; (e) filtro do tipo C.

Fonte: Adaptado de (Leão et al., 2014).

Em (a) e (b) os circuitos RC e RL, respectivamente, apresentam características de seletividade de frequência e por este motivo atuam como filtros. Por ter apenas um armazenador de energia, C ou L, este tipo de filtro é considerado de primeira ordem. A ordem do filtro é igual ao número de capacitores e indutores no circuito, e esta característica influencia diretamente no custo, tamanho físico e complexidade do projeto.

Os filtros amortecidos de primeira ordem podem atuar como passa-baixa ou passa-alta, dependendo de onde se retira o sinal de saída. Os filtros de segunda ordem (c) são os mais utilizados comercialmente para harmônicas a partir da 7ª ordem, porém apresentam altas perdas no resistor à frequência fundamental. Os filtros tipo C tem como principal vantagem uma considerável redução de perdas na frequência fundamental e tem se tornado uma alternativa simples e econômica, este tipo de filtro é principalmente usado em sistemas que apresentem harmônicas com ordem igual ou inferior à 5ª ordem (Leão et al., 2014).

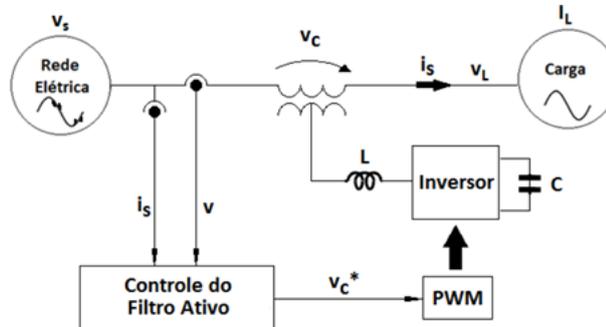
Os filtros sintonizados e amortecidos são muitas vezes aplicados em conjunto para mitigar correntes harmônicas. Cada topologia de filtro apresenta um melhor desempenho perante um determinado tipo de harmônica, por este motivo é necessário fazer a análise do sistema para que se determine qual a melhor topologia a ser utilizada.

### 2.3.2 Filtros Ativos

Os filtros de potência ativos (FPA) são equipamentos que podem compensar harmônicos de tensões e correntes além de possibilitar a compensação da parcela reativa da corrente de carga, compensar desequilíbrio de tensão e corrente, corrigir fator de potência e reduzir o efeito *flicker*. A filtragem ativa utiliza interruptores eletrônicos para produzir correntes que anulem a presença das harmônicas na rede elétrica (Dugan et al., 2002; Ferreira, 2008; Leão et al., 2014). Os FPA podem ser divididos em duas grandes classes: série e paralelo.

O FPA **série** tem a função de filtrar distorções de tensão e atua como uma fonte de tensão

controlada, produzindo uma tensão de compensação  $V_C$  em série com a tensão  $V_S$ , de modo a produzir uma tensão senoidal  $V_L$  no ponto de conexão com a carga sensível, conforme ilustrado na Figura 2.11.



**Figura 2.11** Diagrama básico de um filtro ativo série.

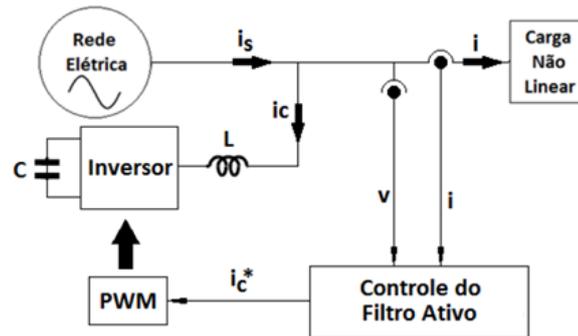
Fonte: Adaptado de (Silviera & Pereira, 2013).

Este tipo de filtro possui um transformador de acoplamento, o qual faz a conexão série do filtro com o barramento ou linha de alimentação da carga. A função de fonte de tensão controlada é desempenhada por um inversor VSI (*Voltage Source Inverter* – fonte de tensão inversora). O controle do filtro é feito via PWM (*Pulse Width Modulation* – modulação por largura de pulso) e atua oferecendo impedância nula para a componente fundamental e elevada para ordens harmônicas de tensão (Diniz, 2014; Ferreira, 2008; Silviera & Pereira, 2013).

Seu princípio de funcionamento se baseia na obstrução do fluxo harmônico entre a fonte e a carga não linear, através da injeção de tensões harmônicas nas ordens desejadas via transformador de acoplamento, as quais são somadas ou subtraídas da tensão da fonte, fornecendo uma forma de onda de tensão o mais puramente senoidal possível para a alimentação das cargas. Uma das características adicionais deste tipo de filtro é a capacidade de compensar corrente reativa (Diniz, 2014; Ferreira, 2008; Leão et al., 2014; Watanabe & Aredes, 1998).

O FPA **paralelo** apresenta um comportamento dual em relação ao FPA série, atuando como uma fonte de corrente controlada conectada em paralelo à carga para produzir uma corrente de compensação  $I_C$  que é somada à corrente  $I_L$ . Por este motivo, a corrente  $I_S$  da fonte pode ser senoidal (Leão et al., 2014; Watanabe & Aredes, 1998).

Este tipo de filtro possui um funcionamento similar ao tipo de filtro anterior, porém a conexão do filtro ao barramento é feita agora por um indutor. Um inversor de tensão e um PWM como controlador do filtro desempenham as principais funções dessa topologia, como pode ser visto na Figura 2.12.



**Figura 2.12** Diagrama básico de um filtro ativo paralelo.

Fonte: (Silviera & Pereira, 2013).

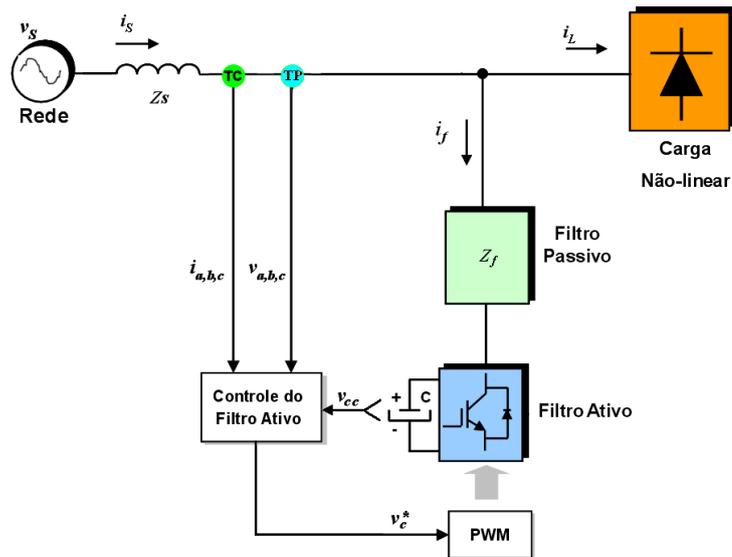
O inversor promove um caminho de baixa impedância para as harmônicas de corrente, geradas pela carga, eliminando sua presença entre fonte e carga. Nesta topologia, o sistema funcionará com seu controle em corrente e terá a função básica de “curto-circuitar” as correntes indesejadas geradas pela carga (Diniz, 2014; Ferreira, 2008; Silviera & Pereira, 2013). Com este arranjo também é possível compensar a corrente reativa fundamental além de mitigar harmônicos de corrente.

A combinação de filtros ativos série e paralelo é utilizada para a compensação simultânea de tensão e corrente. Este tipo de combinação é denominado de UPQC (*Unified Power Quality Conditioner* – Condicionador Unificado de Energia). Esta combinação visa melhorar as fragilidades das topologias quando utilizadas separadamente. Seu uso é apropriado em cargas que ao mesmo tempo que são sensíveis à qualidade de tensão, são cargas responsáveis por injetar correntes harmônicas no sistema (Diniz, 2014; Leão et al., 2014).

### 2.3.3 Filtros Híbridos

Os filtros de potência híbridos (FPH) foram criados como uma alternativa para reduzir a potência a ser processada pelo FPA bem como os problemas de custo elevado deste tipo de filtro. Os filtros híbridos são compostos pela combinação de um ou mais filtros passivos com um filtro ativo de potência reduzida, de maneira que a parte ativa atue apenas sobre as componentes não corrigidas pelo filtro passivo (Lima, 2017).

Existem duas estruturas básicas para o FPH, a série e a paralela. A topologia mais utilizada é aquela em que a parte ativa está conectada em série com o filtro passivo e o conjunto conectado em paralelo com a carga não linear e a rede elétrica. Neste caso, o inversor utiliza uma tensão reduzida, mas conduz a corrente total do filtro passivo (N. Silva, 2012). A Figura 2.13 ilustra a topologia de FPH série para compensação de correntes.

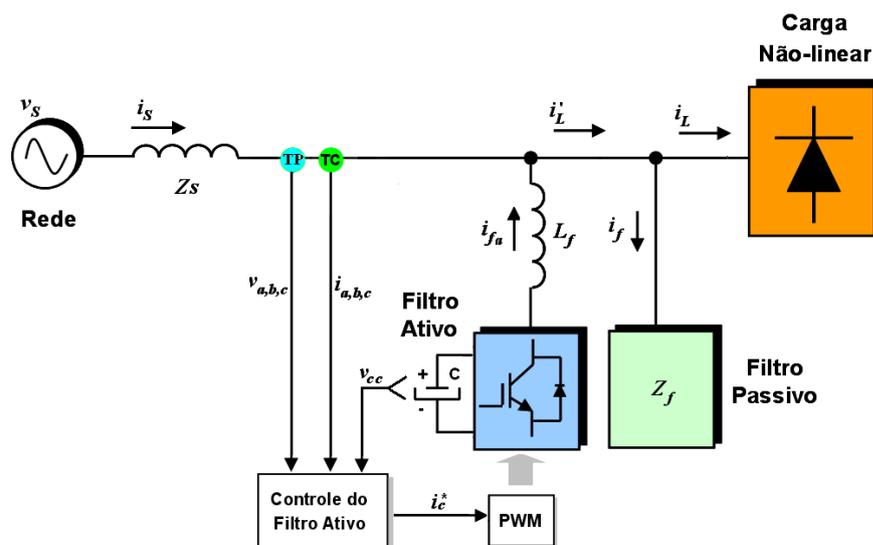


**Figura 2.13** Filtro Híbrido Série.

Fonte: (Antunes, 2009).

Nesta topologia o FPA melhora a qualidade de filtragem harmônica do sistema, o qual é filtrado previamente pelo FPP, além de poder eliminar uma possível ressonância harmônica. Como a maior parte da tensão está aplicada no FPP, o FPA possui baixa potência nominal, tornando essa topologia atrativa para aplicações de elevada potência (Antunes, 2009; Asiminoaei, Wiechowski, Blaabjerg, Krzeszowiak, & Kedra, 2006).

Em um FPH paralelo, tanto o FPA quanto o FPP são conectados em paralelo com a carga não-linear e a rede elétrica, conforme ilustra a Figura 2.14 Nesta topologia as estruturas de filtragem podem operar de forma isolada ou em conjunto, isso permite reduzir a potência nominal do filtro ativo.



**Figura 2.14** Filtro Híbrido Paralelo.

Fonte: (Antunes, 2009).

O FPP fornece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas da carga, além de ser um compensador de reativos na frequência fundamental. Enquanto isso o FPA opera injetando correntes iguais e em fases opostas as das correntes harmônicas da carga não linear, cancelando as harmônicas de forma parcial ou em sua totalidade (Antunes, 2009; N. Silva, 2012).

### 2.3.4 Estado da Arte

O estado da arte acerca do uso de filtros de potência ativos, passivos e híbridos para a mitigação das distorções harmônicas é apresentado a seguir. O método ProKnow – C foi utilizado a fim de escolher os documentos, reconhecidos cientificamente, para compor um referencial teórico consistente.

O método utilizado consiste em uma série de procedimentos sequenciais, iniciando pela definição do mecanismo de busca de artigos científicos a ser utilizado, seguindo por uma série de procedimentos até atingir a fase de filtragem e seleção do portfólio bibliográfico relevante acerca do tema (Santos, Schenatto, & Oliveira, 2017).

A pesquisa foi realizada na base de dados *IEEE Explorer*, *Scopus* e *Web of Science*, considerando trabalhos publicados em até 5 anos e que estivessem dentro das subáreas de engenharia e energia. Foram utilizados três eixos de pesquisa, onde o primeiro continha o termo “*harmonic*”, o segundo eixo continha os termos “*mitigation*”, “*power quality*” e “*study case*” e o último eixo continha os termos “*passive power filter*”, “*active power filter*” e “*hybrid power filter*”. A Tabela 2.2 apresenta os resultados obtidos a partir das pesquisas feitas nos bancos de dados supracitados.

**Tabela 2.2** Resultados das pesquisas realizadas nos bancos de dados escolhidos.

<b>Topologia</b>	<b>Eixo 1</b>	<b>Eixo 2</b>	<b>Eixo 3</b>	<b>Nº de artigos</b>
<b>Filtros Passivos</b>	<i>Harmonic</i>	<i>Mitigation</i>	<i>Passive Power Filter</i>	263
		<i>Power Quality</i>		387
		<i>Case Study</i>		112
<b>Filtros Ativos</b>	<i>Harmonic</i>	<i>Mitigation</i>	<i>Active Power Filter</i>	334
		<i>Power Quality</i>		365
		<i>Case Study</i>		179
<b>Filtros Híbridos</b>	<i>Harmonic</i>	<i>Mitigation</i>	<i>Hybrid Power Filter</i>	188
		<i>Power Quality</i>		399
		<i>Case Study</i>		42

O portfólio bruto foi composto desta maneira por 2269 artigos, que após exclusão de artigos duplicados, foi reduzido para 975. Em seguida foi feita a filtragem pelo alinhamento de títulos, número de citações dos artigos, autores mais citados, leitura dos resumos e por fim leitura dos artigos. Dessa forma tem-se o portfólio bibliográfico. Os artigos selecionados para fazer parte do portfólio bibliográfico são dispostos em tabelas no Apêndice A.

## 2.4 Normas Regulamentadoras

Neste capítulo serão abordadas as normas vigentes utilizadas para avaliar a conformidade da QEE no âmbito de harmônicas. A avaliação da QEE compreende todo procedimento utilizado, direta ou indiretamente, para determinar que se cumpram as prescrições pertinentes dos regulamentos técnicos ou normas.

### 2.4.1 PRODIST – Módulo 8

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) teve sua criação regulamentada no Brasil em 2008, pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. O PRODIST veio com a função de normatizar e padronizar as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica; e é dividido em 11 módulos:

1. Introdução;
2. Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição;
3. Acesso ao Sistema de Distribuição;
4. Procedimentos Operativos do sistema de Distribuição;
5. Sistemas de Medição;
6. Informações Requeridas e Obrigações;
7. Cálculo de Perdas na Distribuição;
8. Qualidade da Energia Elétrica;
9. Ressarcimento de Danos Elétricos;
10. Sistema de Informação Geográfica Regulatório;
11. Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares.

O Módulo 8 do PRODIST tem como objetivo “estabelecer os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações” (ANEEL, 2021). Tem abrangência sobre todos os agentes do sistema elétrico brasileiro, ou seja:

- a) Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) Produtores de energia;
- c) Distribuidoras;

- d) Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema – ONS.

Este procedimento trata na sessão 8.1 – Qualidade do Produto, em seu item 4 – Distorções Harmônicas, sobre fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. A terminologia aplicada ao cálculo das distorções harmônicas pode ser observada na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** Terminologia adotada no PRODIST Módulo 8.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT <sub>h</sub> %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTT <sub>P</sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTT <sub>I</sub> %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT <sub>3</sub> %
Tensão harmônica de ordem h	V <sub>h</sub>
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h <sub>máx</sub>
Ordem harmônica mínima	h <sub>mín</sub>
Tensão fundamental medida	V <sub>1</sub>
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>95</sub> %
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>P95</sub> %
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>I95</sub> %
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>395</sub> %

Fonte: (ANEEL, 2021).

As expressões para o cálculo das grandezas DIT<sub>h</sub>%, DTT%, DTT<sub>P</sub>%, DTT<sub>I</sub>% e DTT<sub>3</sub>% são dadas pelas equações (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), (2.13) respectivamente:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.9)$$

h= ordem harmônica individual

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.10)$$

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{\text{máx}}$

$h_{\text{máx}}$  = conforme classe A ou S

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

$h$  = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ( $h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$ ).

$h_p$  = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.12)$$

$h$  = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ( $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$ ).

$h_i$  = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.13)$$

$h$  = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ( $h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$ )

$h_3$  = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os limites para a distorção harmônica de tensão são dados na Tabela 2.4. Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

**Tabela 2.4** Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10%	8,0%	5,0%
DTT <sub>p</sub> 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DDT <sub>i</sub> 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>3</sub> 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte:(ANEEL, 2021).

No caso de medições realizadas utilizando-se Transformador de Potência (TP) com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador DTT<sub>3</sub>95% deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 2.4 (ANEEL, 2021).

## 2.4.2 IEEE 519-2014

A norma IEEE que trata de limites de harmônicas é proposta no documento IEEE 519-2014 ela é uma revisão da norma IEEE 519-1992 - *Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*.

Esta norma proporciona uma abordagem conjunta entre clientes e concessionárias para limitar o impacto dos distúrbios inseridos pelas cargas não lineares, definindo níveis aceitáveis de distorções harmônicas de tensão e corrente para o ponto de entrega de energia pela concessionária ou no ponto comum de conexão (PCC) também conhecido como PAC (ponto de acoplamento comum).

**Limites de distorção de corrente:** são classificados tanto em relação à tensão nominal dos circuitos quanto às ordens harmônicas individuais. Os limites de distorções na corrente são definidos por faixa de tensão de 120V a 69kV, 69,001kV a 161kV e acima de 161kV, os quais são descritos na Tabela 2.5, Tabela 2.6, Tabela 2.7, respectivamente.

**Tabela 2.5** Limites de distorção de corrente recomendados para sistemas com classificação nominal de 120 V até 69 kV.

<b>Máxima Corrente de distorção harmônica em porcentagem de <math>I_L</math></b>						
Ordem harmônica individual (ordem ímpar) <sup>a,b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20 <sup>C</sup>	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: (IEEE, 2014).

**Tabela 2.6** Limites de distorção de corrente para sistemas acima de 69 kV a 161 kV.

<b>Máxima Corrente de distorção harmônica em porcentagem de <math>I_L</math></b>						
Ordem harmônica individual (ordem ímpar) <sup>a,b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20 <sup>C</sup>	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Fonte: (IEEE, 2014).

**Tabela 2.7** Limites de distorção de corrente para sistemas com classificação > 161 kV.

<b>Máxima Corrente de distorção harmônica em porcentagem de <math>I_L</math></b>						
Ordem harmônica individual (ordem ímpar) <sup>a,b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<25 <sup>c</sup>	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25 < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: (IEEE, 2014).

- a Harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites de harmônicos ímpares acima.
- b Distorções de corrente que resultam em um deslocamento CC, por exemplo, conversores de meia onda, não são permitidas.
- c Todo equipamento de geração de energia é limitado a esses valores de distorção de corrente, independentemente do  $I_{sc} / I_L$  real.

Onde

$I_{sc}$  = corrente máxima de curto-circuito no PCC

$I_L$  = corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PCC sob condições operacionais normais de carga

**Limites de distorção de tensão:** discriminam somente os níveis da tensão nominal dos circuitos no PCC, com limites globais ( $DHT_V$ ) e um único limite para todas as ordens de harmônicas em um mesmo nível de tensão, como pode ser visto na Tabela 2.8.

**Tabela 2.8** Limites de distorções harmônicas de tensão.

<b>Tensão de Barra no PCC</b>	<b>Harmônica Individual (%)</b>	<b>Distorção harmônica Total - <math>DHT_V</math> (%)</b>
$V \leq 1,0$ kV	5,0	8,0
$1$ kV $\leq V \leq 69$ kV	3,0	5,0
$69$ kV $< V \leq 161$ kV	1,5	2,5
$161$ kV $< V$	1,0	1,5 <sup>a</sup>

Fonte: (IEEE, 2014).

a

Os sistemas de alta tensão podem ter até 2,0% de  $DHT_V$ , onde a causa é um terminal HVDC cujos efeitos serão atenuados em pontos da rede em que futuros usuários possam conectado

### 2.4.3 IEC 61000

As normas IEC 61000 são estruturadas em partes, por funções. As normas IEC relacionadas às harmônicas são:

- IEC 61000-2-2;
- IEC 61000-3-6;
- IEC 61000-3-2;
- IEC 61000-3-4;
- IEC 61000-3-12.

As normas IEC61000-3-2, IEC61000-3-4 e IEC 61000-3-12 definem limites para a injeção de correntes harmônicas causadas por equipamentos elétricos e eletrônicos.

A IEC 61000-3-2 avalia e define limites para as componentes harmônicas de corrente para equipamentos com corrente nominal de entrada  $\geq 16$  A por fase conectados em sistemas públicos de baixa tensão.

A IEC61000-3-4 refere-se a equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente nominal de entrada superior a 16 A por fase conectados a sistemas de distribuição CA em baixa tensão.

A IEC 61000-3-12 refere-se a equipamentos elétricos e eletrônicos de tamanho médio ( $16 \text{ A} < I \leq 75 \text{ A}$  por fase) conectados em redes públicas de baixa tensão CA.

A IEC 61000-2-2, (2002) define níveis de compatibilidade para sistemas públicos de distribuição CA em baixa tensão. Essa norma trata de distúrbios encontrados na faixa de frequência de 0 a 9 kHz, com uma extensão específica de 148,5 kHz para alimentação de sistemas de sinalização. As redes possuem tensão nominal de 420 V quando monofásicas e 690 V quando trifásicas. A frequência nominal da rede é de 50 ou 60 Hz.

Os níveis de compatibilidade para tensões harmônicas individuais em rede de baixa tensão para componentes ímpares e pares podem ser vistos na Tabela 2.9 e na Tabela 2.10, respectivamente.

**Tabela 2.9** Níveis de compatibilidade para tensões harmônicas individuais em rede de baixa tensão – componentes ímpares.

Harmônicas Ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas Ímpares não múltiplas de 3	
Ordem h	Harm. Tensão (%)	Ordem h	Harm. Tensão (%)
5	6	3	5
7	5	9	1,5
11	3,5	15	0,4
13	3	21	0,3
$17 \leq h \leq 49$	$2,27(17/h)-0,27$	$21 \leq h \leq 45$	0,2

Fonte: (IEC 61000-2-2, 2002).

**Tabela 2.10** Níveis de compatibilidade para tensões harmônicas individuais em rede de baixa tensão – componentes pares.

Harmônicas Pares	
Ordem h	Harmônica de Tensão (%)
2	2
4	1
6	0,5
8	0,5
$10 \leq h \leq 50$	$0,25(10/h)+0,25$

Fonte: (IEC 61000-2-2, 2002).

Para harmônicos de curta duração ( $\geq 3s$ ) os níveis para componentes harmônicos da Tabela 2.9 e da Tabela 2.10 são multiplicados por um fator  $k = 1,3+0,7(h-5)/45$ .

A norma IEC 61000-3-6, (2008) especifica o percentual de distorção harmônica para a tensão em redes de média (MT), alta (AT) e extra alta tensão (EAT). Os níveis de distorção são especificados para harmônicos individuais de tensão, divididos em harmônicas ímpares e pares, como demonstra a Tabela 2.11 e Tabela 2.12, respectivamente.

**Tabela 2.11** Níveis de compatibilidade de tensões harmônicas - componentes ímpares.

Harmônicas Ímpares					
Múltiplas de 3			Não Múltiplas de 3		
Ordem h	Harm. Tensão (%)		Ordem h	Harm. Tensão (%)	
	MT	AT-EAT		MT	AT-EAT
5	5	2	3	4	2
7	4	2	9	1,2	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2
$17 \leq h \leq 49$	$1,9(17/h)-0,2$	$1,2(17/h)$	$21 \leq h \leq 45$	0,2	0,2

Fonte: (IEC 61000-3-6, 2008).

**Tabela 2.12** Níveis de compatibilidade de tensões harmônicas - componentes pares.

Harmônicas Pares		
Ordem h	Harm. Tensão (%)	
	MT	AT-EAT
2	1,8	1,4
4	1	0,8
6	0,5	0,4
8	0,5	0,4
$10 \leq h \leq 50$	$0,25(10/h)+0,22$	$0,19(10/h)+0,16$

Fonte: (IEC 61000-3-6, 2008).

Os limites de distorção harmônica total de tensão são definidos como  $DHT_V = 6,5\%$  para média tensão e  $DHT_V = 3\%$  para alta e extra alta tensão.

#### 2.4.4 EN 50160:2008

A norma Europeia EN 50160:2008 – *Voltage Characteristic in Public Distribution Systems* define limites de harmônicos e descreve as características principais da tensão de alimentação no PCC para redes de distribuição de baixa e média tensão. O limite de distorção harmônica total de tensão é  $DHT_V < 8\%$ , com valores individuais conforme exemplifica a Tabela 2.13.

**Tabela 2.13** Limite de distorção individual de tensão em rede de distribuição em baixa e média tensão.

Harmônicas Ímpares				Harmônicas Pares	
Não múltiplas de três		Múltiplas de três			
Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)	Ordem h	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0*	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6	0,5
13	3,0	21	0,5	8	0,5
17	2,0	> 21	0,2	10	0,2
19	1,5			> 12	0,2
23	1,5				
25	1,5				

Fonte: (EN 50160, 2008).

\* Conforme a concepção da rede. O valor da harmônica de ordem três pode ser muito inferior.

## 2.5 Usina Termelétrica

O funcionamento de uma UTE é dado a partir da queima de um combustível, neste caso, o carvão mineral. A energia elétrica é gerada através da energia térmica oriunda da combustão produzida pela queima do combustível. Na câmara de combustão, o carvão é queimado gerando energia térmica (calor). Esse calor aquece a água circulante em tubos na caldeira, transformando-a em vapor de alta pressão, o qual faz a turbina da usina girar, acionando o gerador. Com o acionamento do gerador, ocorre a transformação de energia mecânica da turbina em energia elétrica. Finalmente o vapor é condensado, volta para a caldeira em forma líquida e recomeça o ciclo (Pomalis, 2014).

A utilização de carvão mineral tem, como consequência, a geração de resíduos (cinzas), as quais podem ser pesadas ou leves; as pesadas são retidas dentro das caldeiras, enquanto as leves podem ser emitidas para o ambiente. Para evitar ou reduzir essa emissão, são usados os precipitadores eletrostáticos (Pomalis, 2014).

O precipitador eletrostático é um dos dispositivos mais comuns utilizados para controlar a emissão de cinzas de caldeiras, seu princípio de funcionamento consiste no fornecimento de

carga elétrica para as partículas poluentes. As partículas carregadas são submetidas a um campo elétrico de modo que sua velocidade de migração eletrostática cause a coleta das mesmas sobre uma placa aterrada, onde perdem a carga negativa, formando uma camada de pó que será removida do sistema (Meira, 2009).

Neste UTE é utilizado um Precipitador Eletrostático com 98% de eficiência, fabricado por ANSALDO, com tecnologia Joy Westerner (Pomalis, 2014).

# Capítulo 3

## 3. Metodologia

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento desta dissertação de mestrado pertinente à área de Engenharia Elétrica, cujo objetivo principal é comparar o desempenho de filtros de potência passivo e ativo para a mitigação de distorções harmônicas no precipitador eletrostático de uma UTE.

Para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, foi realizada a pesquisa bibliográfica sobre qualidade de energia elétrica, distorções harmônicas, normas regulamentadoras e filtros de potência. O referencial teórico foi escrito com base em artigos, teses, livros e dissertações sendo realizado o mapeamento do estado da arte utilizando-se o método *ProKnow – C*, apresentados no Capítulo 2.

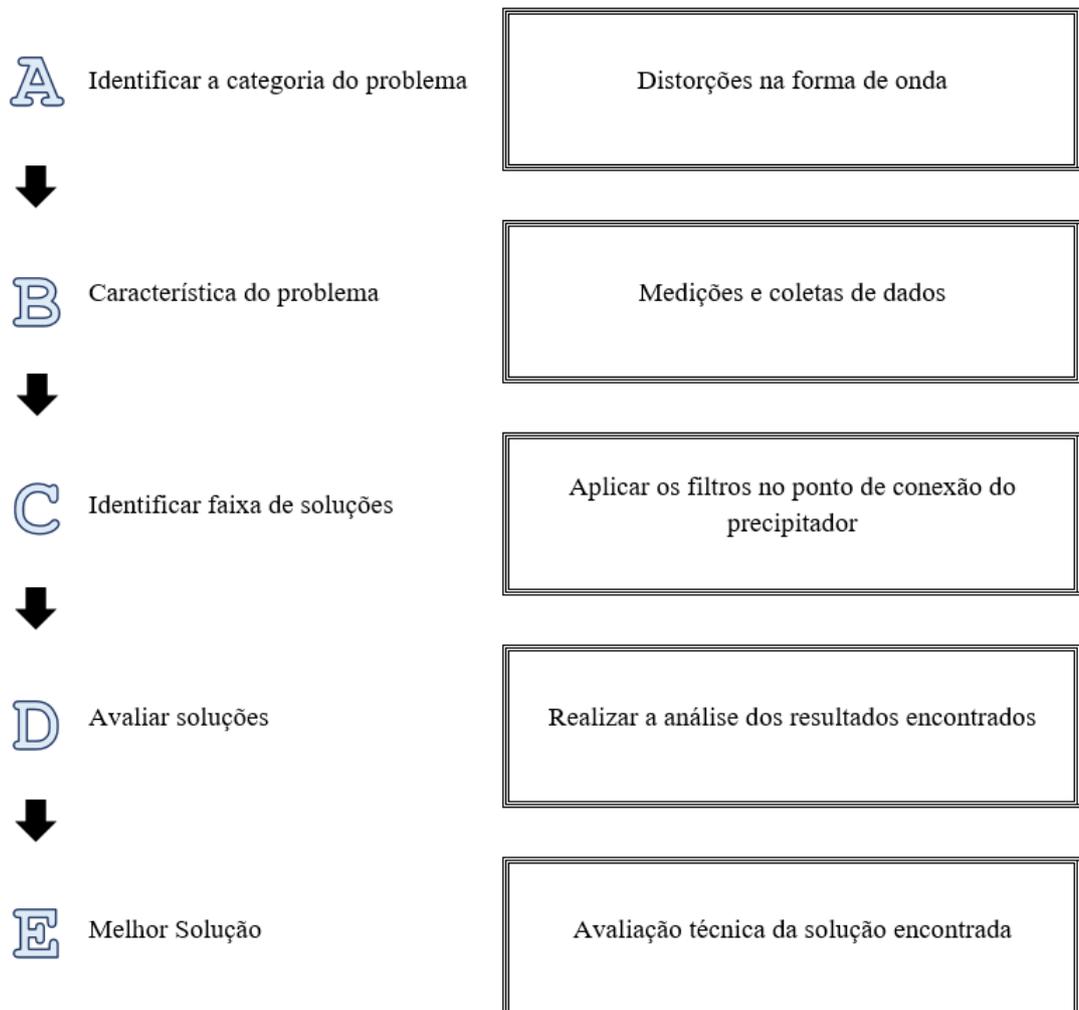
Uma vez realizado o levantamento bibliográfico e análise do estado da arte, constatou-se a relevância do assunto para a área de qualidade da energia elétrica, como forma de mitigação de distorções harmônicas e tendo um ótimo custo benefício para os sistemas de energia. A partir disto, escolheu-se um cenário para fazer um estudo comparativo do desempenho de filtros de potência em um ambiente real. O ambiente escolhido foi o precipitador eletrostático de uma UTE pois, ele apresenta distorções da forma de onda pouco convencionais para sistemas trifásicos, o que torna sua filtragem mais complexa e interessante, visto que as harmônicas pares são mais difíceis de serem mitigadas.

Para isso, foram escolhidas duas topologias, visando analisar seu potencial para mitigação das distorções harmônicas de corrente pois, como trata-se de cargas elétricas, essas distorções na forma de onda da corrente acabam refletindo-se na tensão. A escolha das topologias de filtros levou em consideração o benchmark obtido a partir do mapeamento do Estado da Arte e são apresentadas ao longo deste capítulo.

A primeira topologia a ser analisada será o filtro de potência passivo (FPP) shunt sintonizado. Este tipo de filtro é amplamente utilizado na filtragem de harmônicas com as maiores amplitudes no espectro, o que geralmente corresponde às harmônicas de baixa ordem. Como as distorções encontradas no PCC do precipitador são maiores nas primeiras ordens, este filtro, de simples construção e com baixo custo de projeto, pode mitigá-las satisfatoriamente. Além disso, essa topologia pode ainda corrigir fator de potência, sendo um grande concorrente aos filtros de topologia mais elaborada. São filtros de baixa complexidade, apresentando um projeto simples com custos relativamente baixos, pois, são compostos apenas de componentes passivos.

A segunda topologia a ser analisada será o filtro de potência ativo (FPA) paralelo. Este tipo de filtro é considerado uma solução superior, em relação ao filtro passivo supracitado, para mitigar correntes harmônicas e corrigir fator de potência na rede em aplicações de baixa, média e alta potência. Uma grande vantagem deste filtro é que ele possui uma compensação variável para harmônicas e potência reativa, podendo se ajustar com a variação de carga. A complexidade e o valor de projeto e desenvolvimento desta topologia aumentam, graças à presença de um sistema de controle e das chaves de potência utilizadas para suportar o pico de tensão de linha da rede elétrica.

Como parâmetros de análise e comparação do desempenho dos dois tipos de filtros de potência (passivo e ativo) adota-se a metodologia de análise da QEE, descrita em (Bollen, 2010), sendo adaptada e customizada para melhor refletir a realidade do ponto em estudo (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Etapas para a elaboração dos filtros de potência.

Fonte: Adaptado de (Bollen, 2010).

No passo A, identifica-se qual o tipo de distúrbio a ser tratado. Optou-se por analisar e mitigar a distorção harmônica de corrente encontrada no PCC do precipitador eletrostático, o qual faz parte dos serviços auxiliares de uma UTE.

No passo B é feita a coleta de dados dos distúrbios a serem analisados. Os dados que serão utilizados neste trabalho são dados reais retirados de um estudo realizado por Pomalis, (2014). O estudo de caso proposto, bem como os dados a serem analisados são descritos na seção 3.1.

O passo C trata-se da escolha das topologias de filtros a serem utilizadas para o estudo comparativo na mitigação de harmônicas quando inseridas no PCC junto ao precipitador eletrostático. A escolha destas topologias foi feita levando em consideração as distorções harmônicas de corrente encontradas no passo B.

No passo D é feita a análise dos resultados encontrados após a inserção dos filtros escolhidos, verificando como foi a eficácia das topologias para mitigar os distúrbios presentes no ponto analisado. Esses dados serão abordados no Capítulo 5.

No passo E é feita a análise comparativa dos resultados encontrados no passo anterior e se elege a melhor solução de acordo com os critérios definidos, neste caso, custo-benefício para o sistema.

### **3.1 Estudo de Caso – Precipitador Eletrostático**

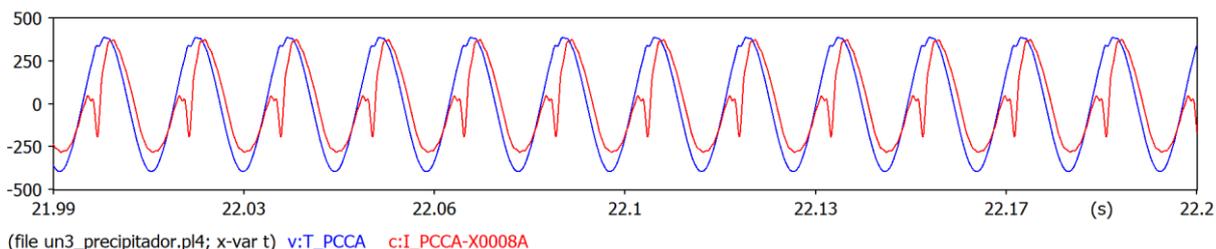
O primeiro passo da metodologia de Bollen (2010), é identificar a categoria do problema que se pretende melhorar. O Sistema Elétrico de Potência (SEP) escolhido é baseado no trabalho realizado por Pomalis (2014), o qual apresenta um estudo de QEE no sistema elétrico industrial de uma concessionária geradora de energia elétrica do Brasil.

Segundo Pomalis (2014), o estudo teve enfoque na distorção harmônica gerada nos serviços auxiliares da UTE. Foram modelados os principais componentes que pertenciam ao SEP, como geradores, transformadores, linhas e cargas não lineares. As distorções de tensão e corrente foram medidas em cinco pontos distintos. O objeto de estudo desta dissertação é a distorção harmônica no PCC do precipitador eletrostático, denominado ponto P6, ilustrado de forma simplificada na Figura 3.2. Para a coleta de dados, segundo passo da metodologia de Bollen, (2010), é necessário analisar as formas de onda de tensão e corrente encontradas no ponto P6.

Na segunda etapa da pesquisa (passo B), coleta de dados dos distúrbios a serem analisados, optou-se por demonstrar apenas os dados retirados da fase A do sistema trifásico, a fim de sintetizar o conteúdo abordado.

A simulação de dados foi feita no PCC de um precipitador eletrostático, este ponto foi nomeado como ponto PCC. Na Figura 3.3 está ilustrada a forma de onda de tensão encontrada na fase A do ponto PCC.





**Figura 3.3** Forma de onda de tensão (azul) e corrente (vermelho) no ponto PCCA.

Fonte: Imagem do autor.

Para se ter noção da distorção harmônica presente em uma forma de onda, é preciso realizar a Transformada Rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), dos pontos. Após realizar a FFT da forma de onda de tensão do precipitador, obteve-se os valores de amplitude de tensão em cada ordem harmônica, sendo possível calcular a distorção harmônica de tensão individual (DHT<sub>i</sub>) e a distorção harmônica total de tensão (DHT<sub>v</sub>). Esses valores podem ser analisados na tabela do Apêndice B.

Para o cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT), faz-se a raiz quadrada do somatório do quadrado das harmônicas de corrente ou tensão, da 2<sup>a</sup> à 25<sup>a</sup> (50<sup>a</sup> em algumas normas), em relação à corrente ou tensão fundamental. Conforme mostram as equações (3.1) e (3.2), de corrente e tensão, respectivamente (Dugan et al., 2002).

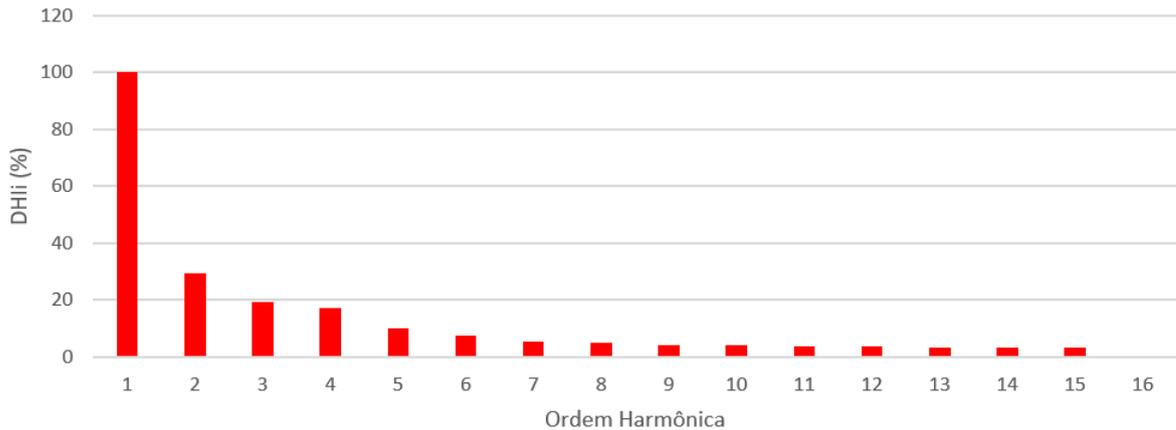
$$DHT_i = \frac{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} I_h^2}{IF} \quad (3.1)$$

$$DHT_v = \frac{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}{VF} \quad (3.2)$$

Onde IF e VF, são as correntes e tensões fundamentais. E h é a ordem harmônica.

A forma de onda de tensão apresenta pouca distorção, a DHT<sub>v</sub> para este ponto foi de 2,076 %, um valor bem abaixo do limite máximo estipulado pela norma IEEE 519-2014. Neste caso, não é necessário que se tomem medidas de mitigação para distorção harmônica de tensão no ponto PCCA.

Diferentemente da forma de onda de tensão, a forma de onda de corrente apresenta distorções facilmente identificáveis, visto que a forma de onda apresenta irregularidades. Da mesma forma, é realizada a FFT dos pontos para obter-se a tabela com os dados da distorção. Após analisar a FFT da forma de onda da corrente do precipitador obteve-se a uma tabela com os valores de distorção de corrente, disponível no Apêndice C. A distorção harmônica total de corrente (DHT<sub>i</sub>) neste ponto foi de 42,63%, um valor bem acima do limite máximo permitido pela norma IEEE 519 – 2014. A ilustração gráfica da FFT pode ser vista na Figura 3.4.



**Figura 3.4** Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHIi) no PCCA.

Fonte: Imagem do autor.

Para definir em qual classe o sistema se encaixa foi necessário encontrar a razão  $I_{SC}/I_L$ , onde  $I_{SC}$  é a corrente máxima de curto-circuito no PCC e  $I_L$  é a corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PCC sob condições operacionais normais de carga. Para esse sistema a razão encontrada foi de aproximadamente 79. Sendo assim os limites de distorção de corrente recomendados para este sistema se enquadra na faixa de  $50 < 100$ , onde a DHT máxima é de 12%. As harmônicas individuais de ordem 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 estão acima dos limites permitidos pela norma, como pode ser analisado na Tabela 3.1, onde foi feita a comparação dos valores de distorção harmônica individual de corrente (DHIi) encontrados e dos valores estipulados pela norma IEEE 519 – 2014.

**Tabela 3.1** Distorções harmônicas individuais em desacordo com a norma IEE 519 -2014.

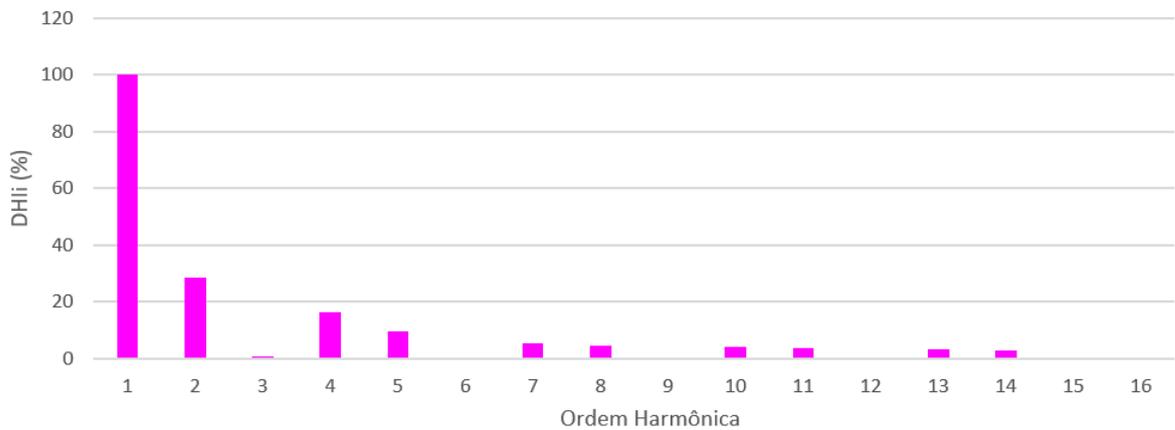
Ordem Harmônica	DHIi (simulada)	DHIi (máx. permitida)
2	29,35227%	2,5%
3	19,17546%	10%
4	17,02204%	2,5%
6	7,550657%	2,5%
8	4,693703%	2,5%
10	4,159088%	2,5%
12	3,476311%	1,125%
14	3,100053%	1,125%

Visto que o sinal apresenta distorções significativas, faz-se necessário analisar formas de mitigação de distorção harmônica de corrente no ponto PCCA. Este projeto de pesquisa tem como objetivo analisar a resposta do sistema às inserções de filtros de potência passivo e ativo.

Ao analisar o circuito do sistema, verifica-se a presença de um transformador com ligação D-Y com neutro aterrado, os dados deste transformador podem ser encontrados no ANEXO B.

Segundo Leão et al. (2014), em transformadores D-Y aterrados, as componentes de corrente de sequência zero circulam no neutro e na linha do lado da carga. Essas componentes ficam confinadas no delta do transformador, impedindo que circulem na linha no lado primário. Sendo assim, o transformador existente no sistema já se encarrega de mitigar as harmônicas de sequência zero (3, 6, 9 e 12).

Analisando o ponto de conexão do transformador (PRE\_AA) obtém-se os valores de distorção harmônica individual e total, os quais podem ser vistos no Apêndice D. A Figura 3.5 ilustra as DHli neste ponto e confirma que as harmônicas de sequência zero (ímpares múltiplas de 3) foram mitigadas da forma de onda de corrente.



**Figura 3.5** Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHli) no PRE\_AA.

Fonte: Imagem do autor.

Com isso, apenas as harmônicas de ordem 2, 4, 8, 10 e 14 serão consideradas para a análise de inserção de filtros.

# Capítulo 4

## 4. Projeto e Dimensionamento

Os dados obtidos através do ATP Draw® serão inseridos, como parâmetros de entrada no MATLAB®, local onde o filtro será calculado. Na Tabela 4.1 é apontado o valor percentual da diferença entre a DHI simulada e a DHI máxima permitida pela norma vigente. Com base nestes valores é iniciada a terceira etapa da pesquisa, o dimensionamento dos filtros.

**Tabela 4.1** Diferença entre a DHI simulada e a máxima permitida pela IEEE 519 – 2014.

Ordem Harmônica	Diferença entre as DHI
2	26,85%
4	14,52%
8	2,19%
10	1,66%
14	1,97%

Com esses dados, é possível determinar qual a sintonia dos filtros passivos que serão utilizados.

### 4.1 Filtro Passivo

A inserção de filtros passivos afeta a forma de onda na frequência fundamental, por este motivo escolheu-se não levar em consideração as distorções harmônicas individuais que apresentam uma tolerância menor que 2% do limite estabelecido pela norma IEEE. Analisando somente, as três maiores harmônicas pares encontradas (2, 4 e 8).

Para iniciar as correções do fator de potência na rede, considerou-se a instalação de 900kVAr de potência reativa dos capacitores dos filtros, sem considerar, inicialmente a influência dos reatores dos filtros e a presença de distorções harmônicas existentes. Com isso, o fator de potência da instalação sofreria uma alteração de 0,11 para 0,76.

Geralmente o filtro harmônico é sintonizado para a menor frequência entre as mais significativas do espectro. Sendo que a frequência de sintonia é selecionada como sendo de 3% a 15% abaixo da desejada, sendo esse percentual denominado “fator de dessintonia”  $d$ , o qual

evita que um filtro sintonizado, ao perder suas características elétricas originais de projeto, por desgaste dos componentes, por exemplo, passe a ter característica capacitiva na frequência de sintonia (Leão et al., 2014). No caso em estudo, optou-se por uma dessintonia de 5%.

Para Leão et al. (2014), “O fator de qualidade é um importante parâmetro relacionado aos filtros harmônicos. Os filtros sintonizados são filtros passa-banda com alto fator de qualidade, em geral compreendido entre 20 e 80, aplicados para filtrar harmônicas de baixa ordem”. O fator de qualidade escolhido para este projeto foi de 50, por ser o valor intermediário da faixa de valores.

Para este sistema escolheu-se implementar os filtros passa-banda de sintonia simples em paralelo para as três maiores harmônicas pares encontradas (ordens 2, 4 e 8), para analisar o desempenho da topologia quanto à mitigação destas distorções.

Uma importante componente do filtro passivo é o capacitor pois fornece a potência reativa capacitiva à rede na frequência fundamental, e por ele passa todo o conteúdo harmônico. Sintonizar o capacitor para filtrar uma determinada harmônica requer a inserção de um reator, com reatância indutiva igual a reatância capacitiva, na frequência sintonizada.

Para múltiplos filtros de sintonia única em paralelo o capacitor correspondente para cada ordem harmônica ( $h$ ) pode ser desenvolvido aproximadamente por meio da equação (4.1) (Leão et al., 2014).

$$Q_{fh} = Q_{com} \times \frac{I_h}{\sum I_h}, h = 2,3,4 \dots \quad (4.1)$$

Onde  $Q_{fh}$  – capacidade do filtro harmônico de ordem  $h$ ,  $Q_{com}$  – potência reativa do capacitor instalado e  $I_h$  - corrente harmônica de ordem  $h$ .

A partir da equação (4.1) calculou-se a  $Q_{fh}$  para as ordens harmônicas escolhidas. Para a harmônica de segunda ordem, a capacidade do filtro harmônico encontrada foi de 319,123 VAr, para a harmônica de quarta ordem foi de 184,332 VAr e finalmente para a harmônica de oitava ordem foi de 51,243 kVAr.

Ressalta-se que para cada capacitor trifásico dimensionado foram consideradas as correntes harmônicas partindo da 2ª até a 30ª ordem. Com base nos cálculos feitos para cada frequência harmônica, haverá a instalação total de capacitores no valor de 554,6987 kVAr nos filtros sintonizados.

Após o dimensionamento da potência reativa de cada capacitor, é calculada a ordem harmônica de sintonia e os valores das reatâncias capacitivas e indutivas do filtro nas equações (4.2), (4.3) e (4.4), respectivamente.

$$h_r^2 = (h - d)^2 \quad (4.2)$$

$$Q_{F,1} \cong \frac{(V_L)^2}{x_{C,1} - x_{L,1}} \quad (4.3)$$

$$X_{L,1} = \frac{X_{C,1}}{h_r^2} \quad (4.4)$$

Onde  $h$  – ordem harmônica,  $d$  – fator de dessintonia – 5%,  $h_r$  – ordem harmônica de dessintonia,  $Q_{F,1}$  – potência projetada para o capacitor,  $V_L$  – tensão de linha da rede,  $X_{C,1}$  – reatância capacitiva do filtro na frequência fundamental e  $X_{L,1}$  - reatância indutiva do filtro na frequência fundamental. Os resultados das equações anteriores podem ser visto na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** Valores de reatância capacitiva e indutiva dos filtros de ordem  $h$ .

Ordem Harmônica	Reatância Capacitiva ( $\Omega$ )	Reatância Indutiva ( $\Omega$ )
2°	0,839100513	0,232437815
4°	1,128424794	0,078145761
8°	3,844580144	0,066561291

Após estes cálculos é possível calcular a reatância efetiva do filtro na frequência fundamental através da equação (4.5), bem como os valores do capacitor, equação (4.6), e do indutor, equação (4.7), de cada filtro. Os resultados das equações podem ser vistos na Tabela 4.3.

$$X_{F,1} = X_{C,1} - X_{L,1} \quad (4.5)$$

$$X_{C,1} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.6)$$

$$X_{L,1} = 2\pi f L \quad (4.7)$$

**Tabela 4.3** Valores da reatância efetiva na frequência fundamental, capacitor e indutor dos filtros de ordem  $h$ .

Ordem Harmônica	Reatância Efetiva ( $\Omega$ )	Capacitor (F)	Indutor (H)
2°	0,606662698	0,003161221	0,000616560
4°	1,050279032	0,002350695	0,000207288
8°	3,778018853	0,000689954	0,000176559

Com os valores de capacitor e indutor calculados, calculou-se então, com a equação (4.8) o valor dos resistores a serem instalados em série, de acordo com o fator de qualidade escolhido para este sistema (FQ=50). Os valores de resistência encontrados podem ser vistos na Tabela 4.4.

$$R = \frac{\sqrt{L}}{FQ} \quad (4.8)$$

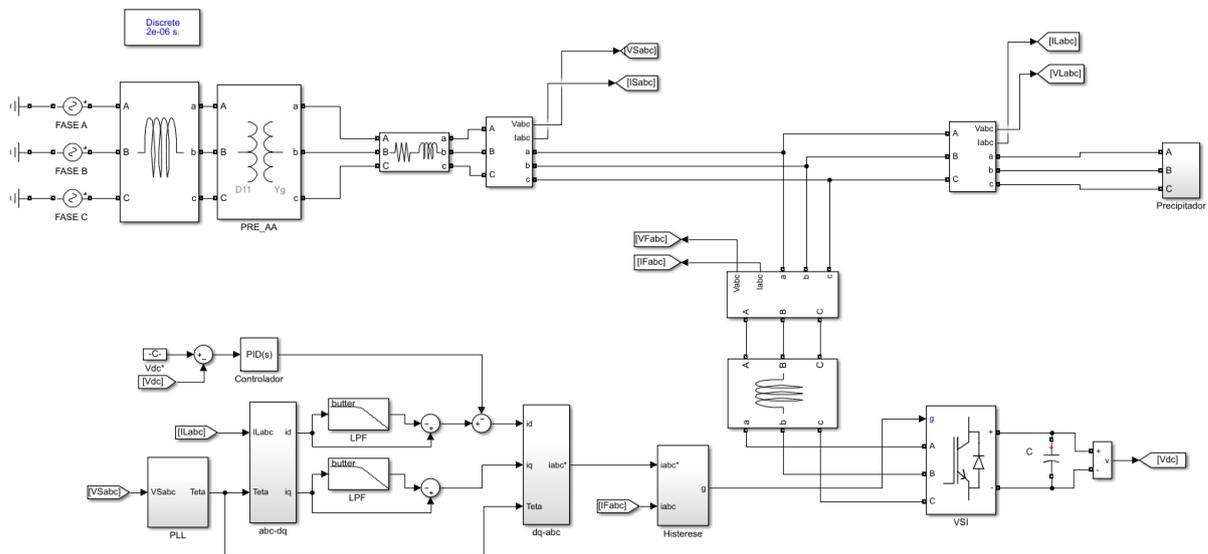
**Tabela 4.4** Valores de resistência encontrados para as harmônicas de ordem 2, 4 e 8.

Ordem Harmônica	Resistência ( $\Omega$ )
2°	0,008832637
4°	0,005939078
8°	0,010117316

Como os valores de resistência encontrados são muito pequenos, essas resistências serão desconsideradas para o cálculo de desempenho dos filtros, o qual pode ser visto no Apêndice E.

## 4.2 Filtro Ativo

Este subcapítulo abordará o princípio de funcionamento, parâmetros de projeto e a teoria matemática utilizada para gerar as correntes de compensação do filtro de potência ativo paralelo, baseado no Inversor VSI. O FPA desenvolvido pode ser visto na Figura 4.1.



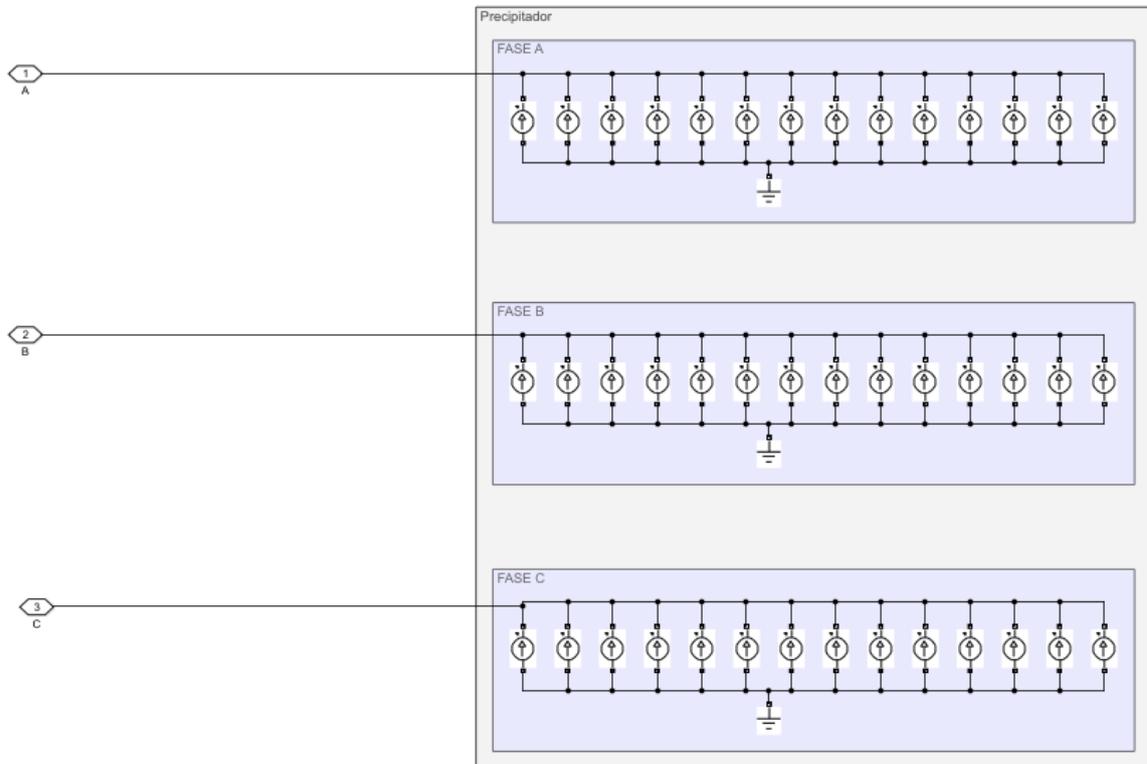
**Figura 4.1** Filtro de Potência Ativo Paralelo.

Fonte: Imagem do autor.

A primeira etapa do projeto do filtro ativo foi obter uma forma de onda de corrente com as mesmas características harmônicas do sistema modelado em ATP Draw®.

### 4.2.1 Carga não linear – Precipitador Eletrostático

Utilizou-se fontes de corrente para representar as cargas não lineares do precipitador, conforme ilustrado na Figura 4.2.

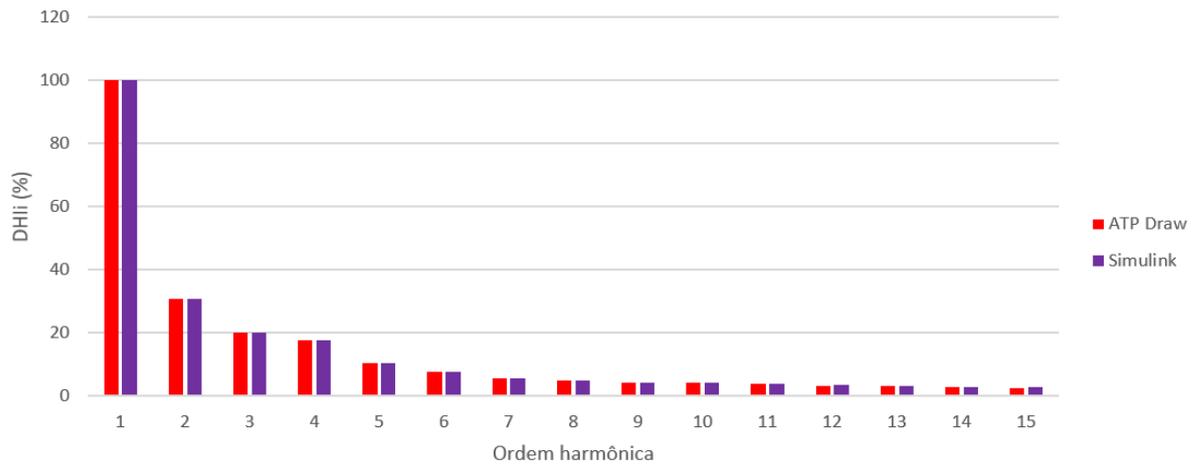


**Figura 4.2** Representação das cargas não lineares do precipitador no Simulink®.

Fonte: Imagem do autor.

As fontes de corrente foram preenchidas com a amplitude, ângulo de fase e frequência de acordo com dados disponibilizados por Pomalis, 2014. Segundo a autora, é necessário deixar claro que esta estratégia pode ser empregada quando são disponibilizadas informações precisas, como medições, a respeito do conteúdo harmônico da corrente drenada por determinada carga.

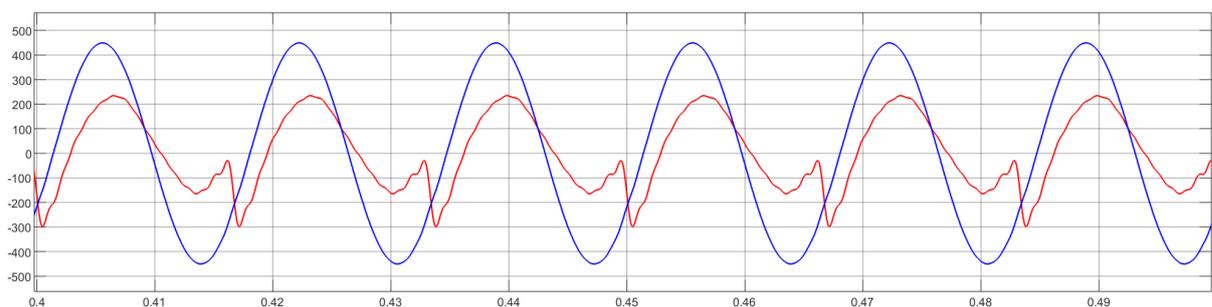
Uma comparação dos valores de DHI encontrados na forma de onda do ATP Draw® e do Simulink® podem ser vistas na Figura 4.3.



**Figura 4.3** Comparação das DHIi's do sistema modelado em ATP Draw® (vermelho) e do sistema modelado em Simulink® (roxo).

Fonte: Imagem do autor.

A forma de onda de corrente simulada no Simulink® tem uma amplitude de 196,7 A na frequência fundamental e apresenta uma DHTi de 44,28%. Na Figura 4.4 estão ilustradas as formas de onda de tensão (azul) e corrente (vermelho) obtidas na fase A do ponto PCC do sistema modelado em Simulink®.



**Figura 4.4** Forma de onda de tensão (azul) e corrente (vermelho) na fase A do ponto PCC do sistema modelado em Simulink®.

Fonte: Imagem do autor.

A forma de onda, obtida no Simulink®, apresenta um valor de DHTi e DHIi muito próximo do valor obtido no ATP Draw®. Após a obtenção da forma de onda de corrente, foi possível desenvolver a parte responsável pela geração das correntes de referência.

## 4.2.2 Gerador das correntes de referência

A corrente injetada na rede elétrica pelo filtro ativo é formada através do uso de técnicas de controle digital. Para a obtenção dos sinais de referência, várias técnicas poderão ser utilizadas. As técnicas de controle no domínio do tempo são mais simples e fáceis de se implementar nos controladores em tempo real. Grande parte dos pesquisadores internacionais

trabalham com as técnicas nesse domínio. Isto, devido à robustez, facilidade de implementação, menor número de cálculos, melhor o processamento computacional, entre outras vantagens (Troncha, Santos, Souza, Azevedo Jr, & Moura, 2018), uma dessas técnicas é a Teoria do Referencial Síncrono, do inglês *Synchronous Reference Frame* (SRF), também conhecida como Teoria d-q.

O controle utilizando a teoria dq realiza a separação das correntes harmônicas da fundamental através das transformações das tensões e correntes do sistema de abc para dq0 (Limongi, 2006; Satpathy & Bebartha, 2013), utilizando as transformadas de Clarke ( $abc - \alpha\beta$ ) e Park ( $\alpha\beta - dq$ ), explicadas em (Satpathy & Bebartha, 2013).

Este método consiste em, a partir da leitura das correntes de carga trifásicas, transformar o sinal obtido em um sistema bifásico com eixos estacionários (transformada de Clarke) e depois em um sistema eixos rotativos bifásicos (transformada de Park). As correntes no formato dq são filtradas, resultando apenas em correntes harmônicas, as correntes de referência do filtro (P. V. Silva et al., 2011).

A partir das transformadas de Clarke e Park, é possível determinar as equações do bloco abc-dq, as quais são denominadas  $i_d$  e  $i_q$ , equações (4.9) e (4.10), respectivamente.

$$i_d = \frac{2}{3} \left[ i_a \cos\theta + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (4.9)$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[ i_a \sin\theta + i_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (4.10)$$

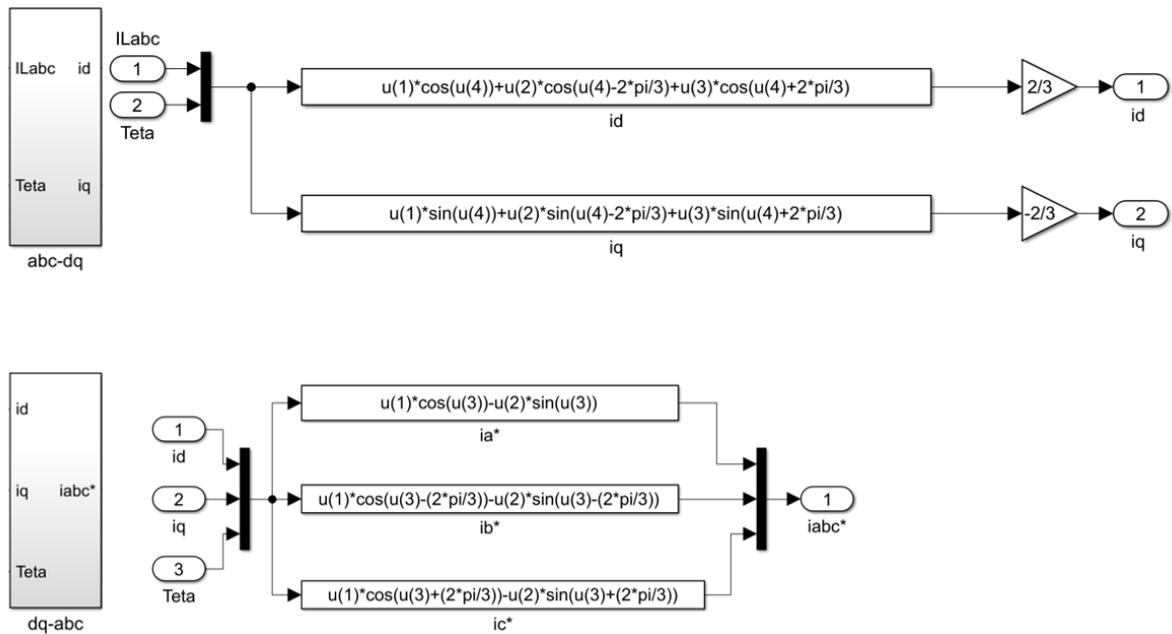
As equações do bloco dq-abc, as quais são denominadas  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  é formado pelas equações (4.11), (4.12) e (4.13), respectivamente.

$$i_a = i_d \cos\theta - i_q \sin\theta \quad (4.11)$$

$$i_b = i_d \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - i_q \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.12)$$

$$i_c = i_d \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - i_q \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.13)$$

A Figura 4.5 apresenta os blocos matemáticos, da teoria dq, desenvolvidos no Simulink®.



**Figura 4.5** Teoria SRF desenvolvida no Simulink®.

Fonte: Imagem do autor.

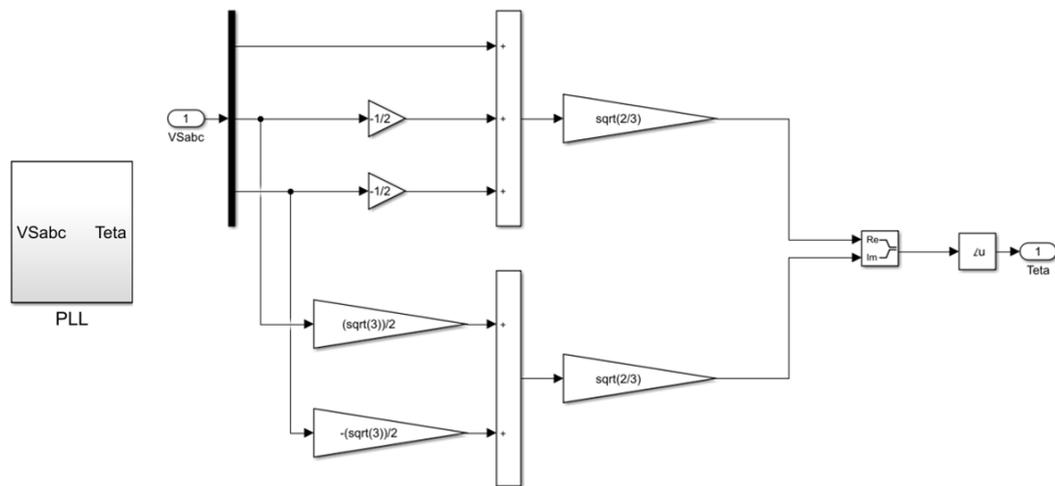
Esta teoria foi escolhida para a implementação do filtro por ser uma teoria já consolidada em acionamentos e controles elétricos e por possuir um bom desempenho (Limongi, 2006). Outra característica importante dessa teoria é a simplicidade matemática, que envolve apenas cálculo algébrico.

Segundo Satpathy & Bebartha, (2013), os componentes médio e oscilante podem ser separados passando por um filtro passa-baixa, do inglês *Low Pass Filter* (LPF), que fornece o componente médio e, portanto, subtraindo-o do sinal real, obtemos o componente oscilante de alta frequência. O motivo de não se utilizar diretamente um filtro passa-alta para obtenção das componentes harmônicas, está no fato de que este iria gerar defasagens na componente fundamental e, dessa forma, causaria imprecisões nas correntes de referência. Nesta pesquisa utilizou-se um LPF *Butterworth* de quarta ordem com frequência de corte  $f_c = \frac{f}{2} = 30\text{Hz}$ .

Observa-se nas equações de (4.9)-(4.13), a necessidade dos sinais de sincronismo, ou seja, as coordenadas do vetor unitário,  $\sin\theta$  e  $\cos\theta$ , os quais proporcionam o sincronismo com a rede de alimentação do sistema e são conseguidos através de um circuito de detecção do ângulo de fase, conhecido como *Phase Locked Loop* (PLL). O ângulo  $\theta = \omega t$ , representa a posição angular do sistema de eixos de referência síncrona, sendo  $\omega = 2\pi f$  a frequência angular do sistema elétrico na frequência fundamental  $f$ . Para modelar o PLL no Simulink® utilizou-se a Transformada de Clarke simplificada, equação (4.14), para um sistema trifásico balanceado, sendo assim  $v_0 = i_0 = 0$ .

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

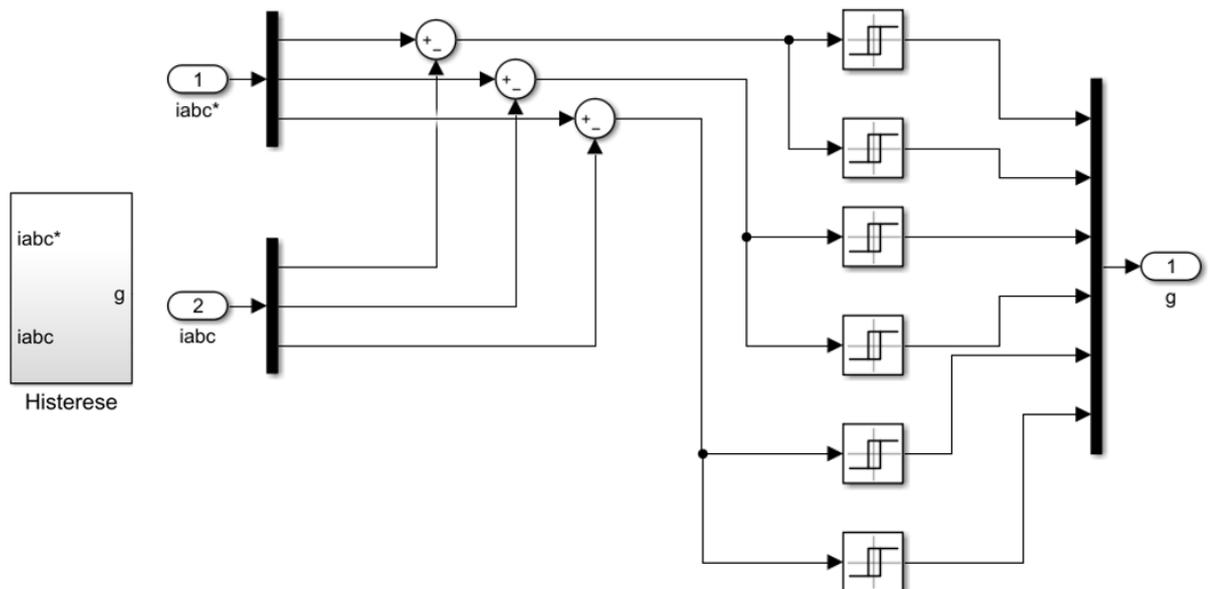
Na Figura 4.6 está representado o bloco PLL desenvolvido para o filtro ativo paralelo.



**Figura 4.6** PLL desenvolvido no Simulink®.

Fonte: Imagem do autor.

A última etapa do gerador de correntes de referência é o bloco do controlador de corrente por histerese, ilustrado na Figura 4.7. Este controlador é responsável por gerar em sua saída os sinais de comando do inversor (VSI).



**Figura 4.7** Controlador de corrente desenvolvido no Simulink®.

Fonte: Imagem do autor.

O controlador de corrente utilizado é composto por três comparadores independentes de histerese de dois níveis operando em um VSI de três pernas. As principais vantagens deste controlador é a simplicidade de implementação, robustez e ótimo desempenho. A próxima etapa da implementação do filtro é controlar a tensão no elo de corrente contínua (CC).

### 4.2.3 Regulador de tensão no elo CC

A regulação de tensão do lado CC do VSI é feita pela parte denominada regulador de tensão CC. É utilizado um controlador Proporcional-Integral (PI) para realizar este trabalho, o qual é alimentado com a tensão de erro do capacitor, denominada  $V_{dc}$ .

A corrente de referência do eixo d é obtida subtraindo os componentes do eixo d de ordem superior (obtidos do gerador de corrente harmônica) da saída do regulador de tensão CC. De forma análoga, a corrente de referência do eixo q é obtida subtraindo o componente do eixo q de ordem superior (obtido do gerador de corrente harmônica) do primeiro componente do eixo q harmônico (Satpathy & Bebartha, 2013).

Para estabilizar a tensão no elo CC, o controlador PI foi sintonizado de acordo com o método de tentativa e erro descrito em (Souza & Figueiredo da Silva, 2013). O método consiste em manter o ganho integral ( $K_i$ ) igual a zero e aumentar o ganho proporcional ( $K_p$ ) até que se obtenha a resposta ao degrau desejada. Ao encontrar uma resposta satisfatória em regime permanente, fixa-se o valor de  $K_p$  no valor encontrado. Para melhorar a resposta do sistema no regime transitório, aumenta-se o  $K_i$  até que se obtenha o resultado esperado. Neste caso, a sintonia ocorreu em  $K_p=1,02$  e  $K_i=0,5$ .

### 4.2.4 Parâmetros de projeto

Um inversor de fonte de tensão (VSI) de três pernas é usado como filtro ativo e tem seis transistores bipolares de porta isolada (IGBTs), três indutores de interface e um capacitor CC. A tensão de linha para linha ( $V_{L-L}$ ) do VSI é considerada 450V. Abaixo serão exibidas as equações utilizadas para a parametrização do conversor (Troncha et al., 2018).

**Tensão no capacitor CC** - a tensão mínima do barramento CC deve ser maior que o dobro do pico da tensão de fase do sistema. A tensão do barramento CC é calculada como:

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2} \times V_{L-L}}{\sqrt{3m}} \quad (4.15)$$

Onde,

$m$	Índice de modulação
$V_{L-L}$	Tensão de linha

**Capacitor do elo CC** - O valor do capacitor CC ( $C_{dc}$ ) depende da energia instantânea disponível para o filtro ativo durante os transientes. O princípio da conservação de energia é aplicado como:

$$\frac{1}{2}C_{dc}[(V_{dc}^2) - (V_{dc1}^2)] = 3V_{L-N} (aI)t \quad (4.16)$$

Onde,

$V_{dc}$	Tensão no elo CC
$V_{dc1}$	Nível mínimo de tensão do barramento CC
$V_{L-N}$	Tensão de fase do sistema
$a$	Fator de sobrecarga
$I$	Corrente de fase do conversor
$t$	Tempo em que a tensão no barramento CC deve ser reestabelecida

**Indutor de alisamento do lado da corrente alternada (CA)** – A seleção da indutância depende da ondulação da corrente, frequência de chaveamento, tensão do barramento CC e o é dada como:

$$L_f = \frac{\sqrt{3}mV_{dc}}{12af_s i_{cr(p-p)}} \quad (4.17)$$

Onde,

$f_s$	Frequência de chaveamento
$i_{cr(p-p)}$	Ondulação ( <i>ripple</i> ) da corrente

Após os cálculos, foram feitas simulações alterando as variáveis  $a$ ,  $m$  e  $t$  a fim de se obter o melhor resultado possível para o sistema analisado. Na Tabela 4.5 são exibidos os dados utilizados para a simulação final do filtro ativo paralelo.

**Tabela 4.5** Parâmetros utilizados para modelar o filtro ativo paralelo no Simulink®.

Dados utilizados na simulação	
Tensão da fonte	450 V
Frequência do sistema	60 Hz
Tensão de referência do elo CC	1000 V
Capacitor do elo CC	10 mF
Indutor de Alisamento	2 mH

# Capítulo 5

## 5. Simulações e Resultados

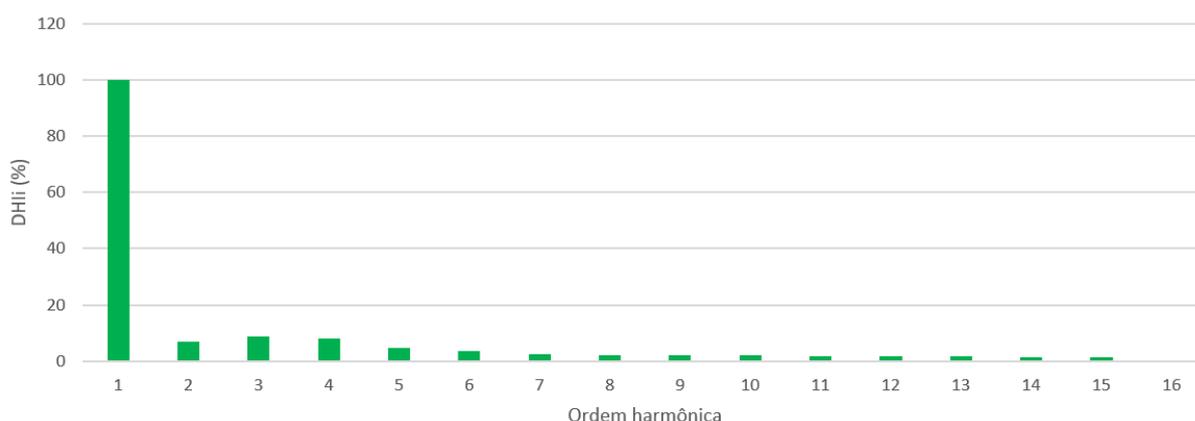
Neste Capítulo são expostos os resultados obtidos a partir da inserção dos filtros projetados no Capítulo anterior.

### 5.1 Filtro Passivo

Os filtros passivos foram inseridos no sistema modelado em ATP Draw®. A DHTi original do sistema, sem a inserção de filtros era de 42,63%. Os desempenhos dos filtros foram primeiramente analisados de forma separada. Após a análise individual de cada filtro foi feita a associações deles para verificar qual era a melhor solução entre os filtros passivos.

#### 5.1.1 Filtro de ordem 2

Com a inserção do filtro de segunda ordem a DHTi diminuiu significativamente e o valor encontrado foi de 16,13%. Os valores que foram utilizados para fazer a Figura 5.1 podem ser encontrados no Apêndice F.



**Figura 5.1** DHTi no PCCA com o filtro de ordem 2.

Fonte: Imagem do autor.

Com a inserção apenas do filtro de ordem 2, a DHTi (16,13 %) permanece acima do valor máximo estipulado pela norma que é de 12 %. As distorções individuais de corrente diminuiram

de forma satisfatória, porém continuaram acima do máximo permitido pela norma. A amplitude da corrente na frequência fundamental aumentou de 280,07 A para 522,68 A. Todo filtro possui componentes ativos e reativos, tornando-se uma carga para o sistema.

A análise da mitigação das harmônicas de sequência zero é feita no ponto PRE\_AA pois, como dito anteriormente o transformador presente no sistema já realiza a correção das mesmas. Foi encontrada uma DHTi de 13,46% no ponto PRE\_AA, um valor acima do limite máximo estabelecido pela norma IEEE 519-2014.

### 5.1.2 Filtro de ordem 4

Com a inserção do filtro de quarta ordem a DHTi aumentou moderadamente e o valor encontrado foi de 44,57%. Os valores que foram utilizados para fazer a Figura 5.2 podem ser encontrados no Apêndice G.



**Figura 5.2** DHTi no PCCA com o filtro de ordem 4.

Fonte: Imagem do autor.

Com a inserção apenas do filtro de ordem 4, a DHTi (44,57%) permanece acima do valor máximo estipulado pela norma que é de 12%. As distorções individuais de corrente de ordem 2 e 3 aumentaram, enquanto as demais distorções diminuíram. A amplitude da corrente na frequência fundamental aumentou de 280,07 A para 307,99 A.

A análise da mitigação das harmônicas de sequência zero é feita no ponto PRE\_AA pois, como dito anteriormente o transformador presente no sistema já realiza a correção das mesmas. Foi encontrada uma DHTi de 33,47% no ponto PRE\_AA, um valor acima do limite máximo estabelecido pela norma IEEE 519-2014.

### 5.1.3 Filtro de ordem 8

Com a inserção do filtro de oitava ordem a DHTi aumentou expressivamente e o valor encontrado foi de 94,48%, indicando que a inserção do filtro não trouxe resultados positivos, apenas acrescentou mais ruído ao sistema original. As distorções individuais de corrente de todas as ordens foram aumentadas, como pode ser visto no Apêndice H.

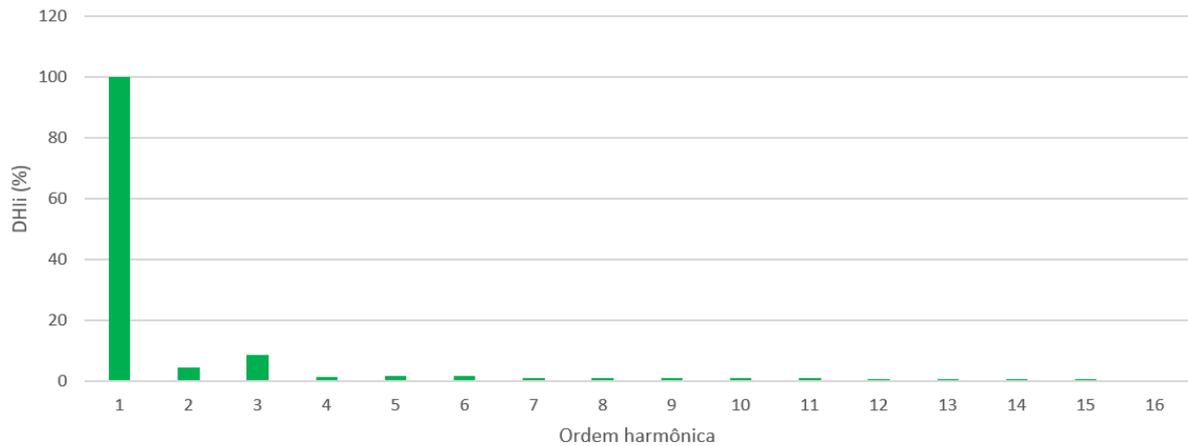
De acordo com Pomilio, 2010, isso ocorre pois surgem ressonâncias paralelas entre os elementos de filtragem com a impedância de entrada da fonte de alimentação. O surgimento dessa ressonância pode ser observado pelo aumento da impedância. Caso existam componentes harmônicas nessas frequências, como é o caso, elas produzirão um ganho de tensão e serão amplificadas, justificando assim o comportamento do filtro de ordem 8. Na simulação é possível verificar como ocorrem ressonâncias entre a impedância da rede e o capacitor de correção do filtro passivo.

Para Pomilio, 2010, uma maneira de reduzir a interação entre filtros e a rede é fazer o acoplamento do filtro através de uma indutância, procurando isolar eletricamente (em alta frequência) os diversos sistemas. Porém esta solução é custosa e aumenta as perdas e a queda de tensão para a carga. E para inserir essa indutância, a mesma deve ser incluída no cálculo inicial do filtro, visto que ela alterará as ressonâncias do sistema.

Com isso, optou-se por descartar o filtro de oitava ordem pois, a inserção do filtro não trouxe nenhum benefício para o sistema.

### 5.1.4 Filtros de ordem 2 e 4

Após analisar o resultado dos filtros de forma individual, fez-se a associação dos filtros de ordem 2 e 4 em paralelo. Com a inserção da associação dos dois filtros a DHTi diminuiu expressivamente e o valor encontrado foi de 10,35%. Os valores que foram utilizados para fazer a Figura 5.3 podem ser encontrados no Apêndice I.

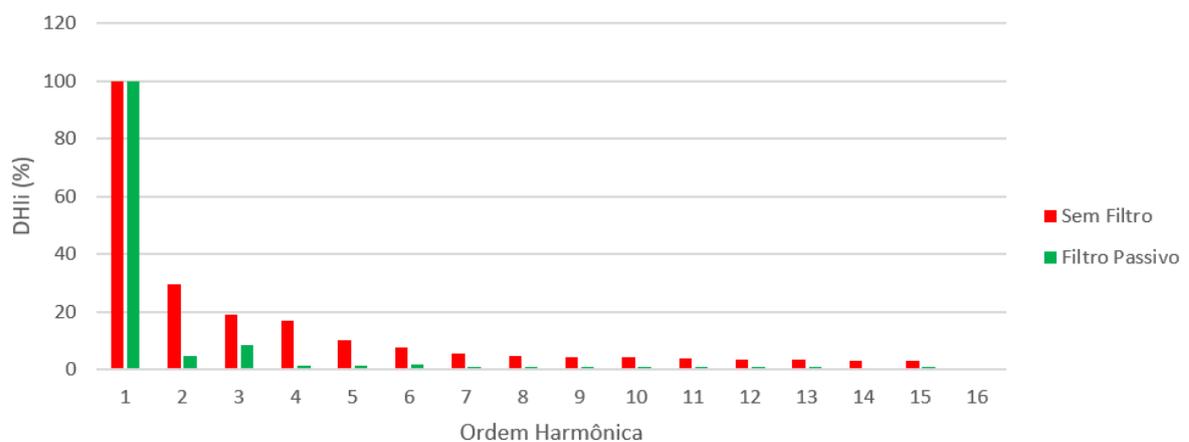


**Figura 5.3** DHIi no PCCA com a associação dos filtros de ordem 2 e 4.

Fonte: Imagem do autor.

Ao associar os dois filtros em paralelo (ordem 2 e 4) o resultado de mitigação foi satisfatório e o valor de DHTi está dentro dos limites estabelecidos pela norma IEE 519-2014, portanto o filtro de ordem 8 foi descartado. A amplitude da corrente na frequência fundamental aumentou de 280,07 A para 877,66 A.

Na Figura 5.4 estão ilustradas as DHIi's do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde).

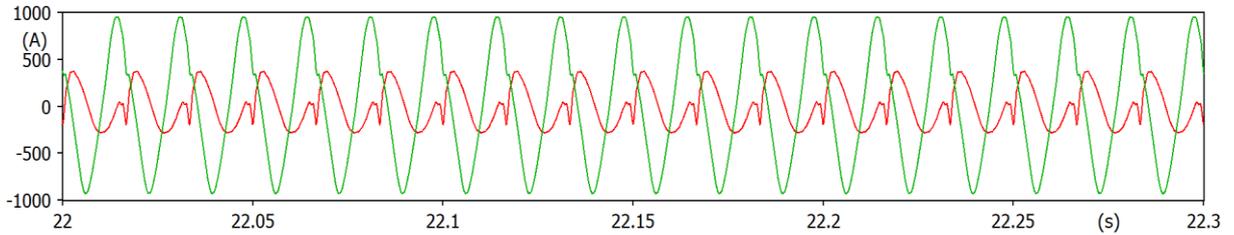


**Figura 5.4** Comparação da DHIi do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde).

Fonte: Imagem do autor.

A DHIi na harmônica de segunda ordem era de 29,35% no sistema original e passou a ser de 4,55% no sistema com a inserção dos dois filtros, a DHIi na harmônica de quarta ordem era de 17,02% e passou a ser de 1,18%, e finalmente a DHIi na harmônica de oitava ordem era de 4,69% e passou a ser de 0,96%. Apesar de apresentar um resultado satisfatório na DHTi, a DHIi de ordem 2 ainda pode ser aprimorada, pois o limite estabelecido pela norma é de 2,5%. Na Figura 5.5 estão ilustradas as formas de onda de corrente do sistema original (vermelho) e

do sistema com a inserção da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde).

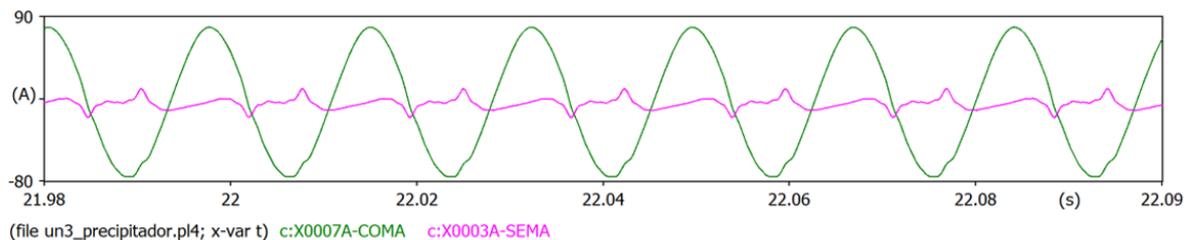


**Figura 5.5** Comparação da forma de onda de corrente no ponto PCCA do sistema original (vermelho) e após a inserção da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde).

Fonte: Imagem do autor.

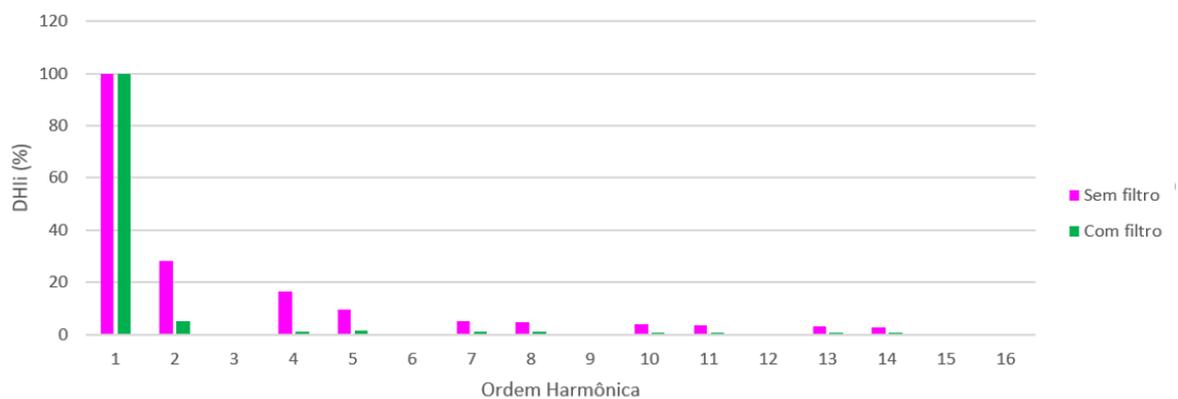
A mitigação das harmônicas foi satisfatória, porém houve um aumento de consumo após a inserção do filtro. Pode-se concluir que a presença de vários filtros numa mesma rede produz interferências mútuas (Pomilio, 2010). O resultado de cada filtro pode facilmente ser influenciado pela presença dos demais filtros e cargas.

A análise da mitigação das harmônicas de sequência zero é feita no ponto PRE\_AA pois, como dito anteriormente o transformador presente no sistema já realiza a correção das mesmas. Na Figura 5.6 estão ilustradas a forma de onda e a DHII de corrente no ponto PRE\_AA, respectivamente.



(file un3\_precipitador.pl4; x-var t) c:X0007A-COMA c:X0003A-SEMA

DHII no PRE\_AA



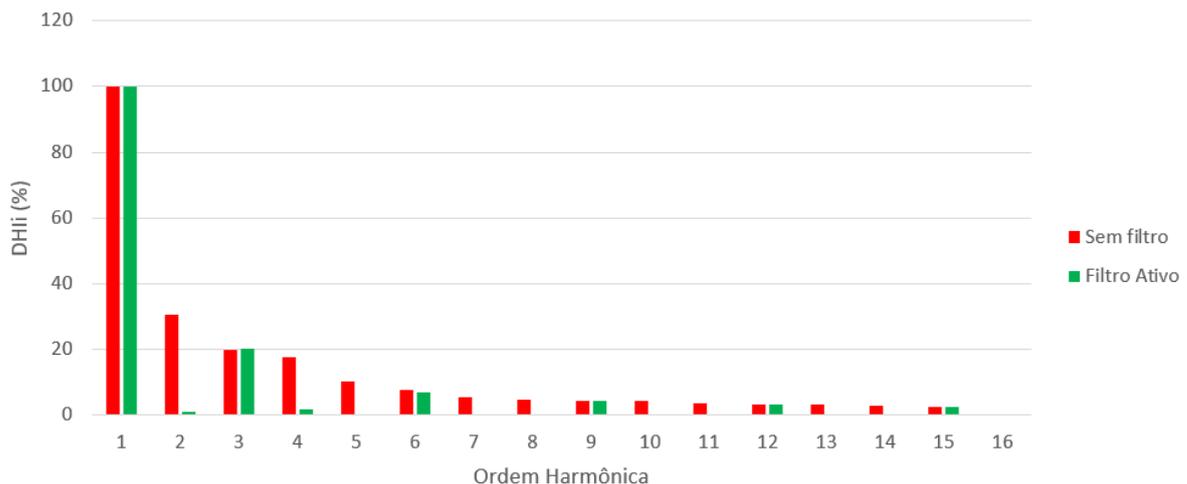
**Figura 5.6** Forma de onda e DHII no ponto PRE\_AA antes (rosa) e depois da associação dos filtros passivos de segunda e quarta ordem (verde).

Fonte: Imagem do autor.

Pode-se perceber que as harmônicas de sequência zero foram devidamente mitigadas. A DHTi encontrada neste ponto foi de 5,998%. Os valores que foram utilizados para fazer a Figura 5.6 podem ser encontrados no Apêndice J. A amplitude de corrente neste ponto sem a inserção de filtros era de 21,01 A, após a inserção o valor de amplitude encontrado foi de 61,43 A, houve um aumento de consumo devido à inserção dos filtros, o que já era esperado pois o filtro acaba sendo visto como uma carga pelo sistema.

## 5.2 Filtro Ativo

O filtro ativo foi inserido no sistema modelado em Simulink®. A DHTi original do sistema, sem a inserção do filtro era de 44,185%. Com a inserção do filtro ativo a DHTi diminuiu consideravelmente e o valor encontrado foi de 22,246%. Na Figura 5.7 estão ilustradas as DHli's do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção do filtro ativo (verde).

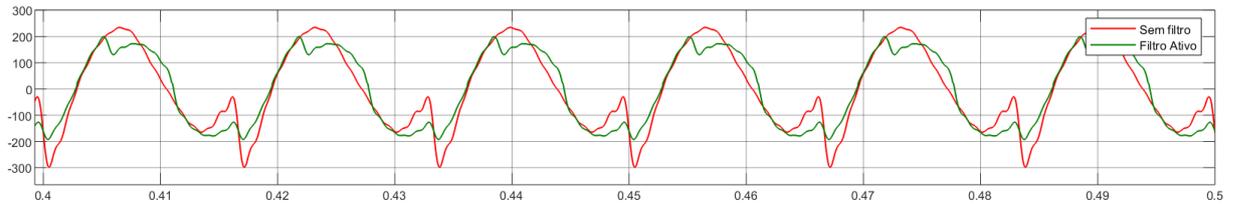


**Figura 5.7** Comparação da DHli do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção do filtro ativo (verde).

Fonte: Imagem do autor.

Como era de se esperar, devido a topologia escolhida, as harmônicas de sequência zero não foram mitigadas. Entretanto, na hora da escolha da topologia já havia sido levado em consideração que o transformador existente no sistema se encarregaria de mitigar essa classe de harmônicas.

A DHli na harmônica de segunda ordem era de 30,66% no sistema original e passou a ser de 1,05% com a inserção do filtro ativo, a DHli na harmônica de quarta ordem era de 17,55% e passou a ser de 1,81%, e finalmente a DHli na harmônica de oitava ordem era de 4,80% e passou a ser de 0,42%. Apesar da DHTi ficar acima do limite estabelecido pela norma IEEE 519-2014, as DHli de sequência positiva e negativa foram aprimoradas e estão de acordo com a mesma. Na Figura 5.8 estão ilustradas as formas de onda de corrente do sistema original (vermelho) e do sistema com a inserção do filtro ativo (verde).

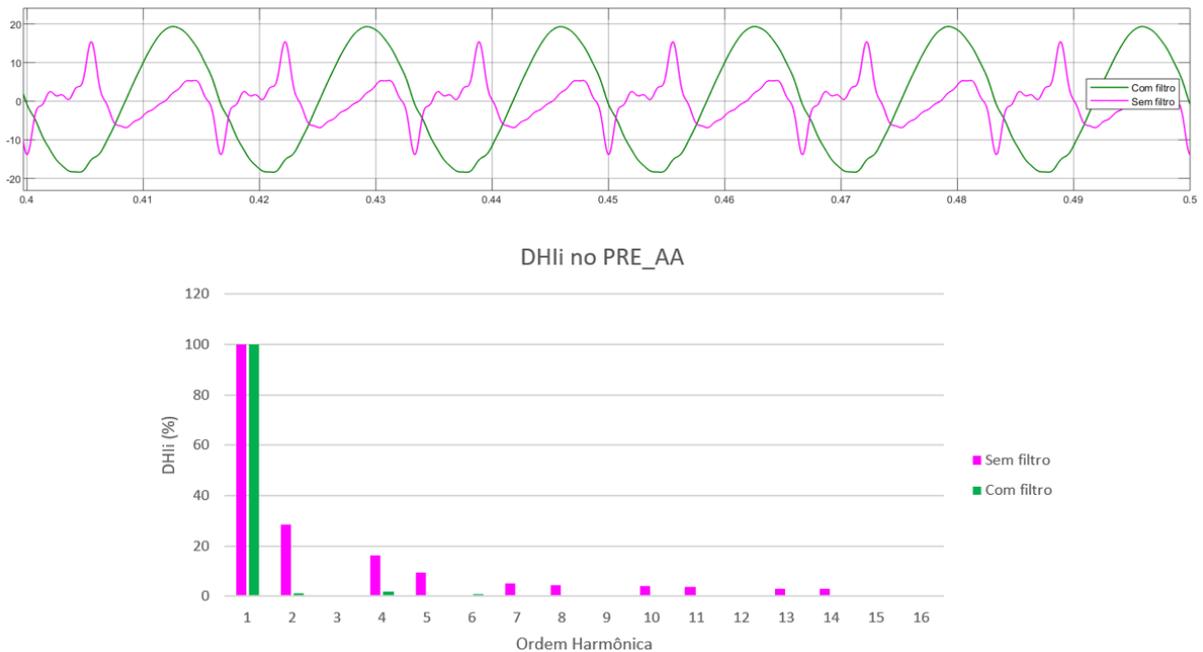


**Figura 5.8** Comparação da forma de onda de corrente no ponto PCCA do sistema original (vermelho) e após a inserção da associação do filtro ativo (verde).

Fonte: Imagem do autor.

Apesar da forma de onda ainda estar longe de uma senoide perfeita, o filtro ativo trouxe um resultado satisfatório, diminuindo a DHTi em 50% do valor original. A amplitude de corrente neste ponto sem a inserção do filtro era de 196,7 A, após a inserção o valor de amplitude encontrado foi de 198,1 A, houve um aumento pequeno de consumo devido à inserção do filtro ativo.

A análise da mitigação das harmônicas de sequência zero é feita no ponto PRE\_AA pois, como dito anteriormente o transformador presente no sistema já realiza a correção das mesmas. Na Figura 5.9 estão ilustradas a forma de onda e a DHli de corrente no ponto PRE\_AA, respectivamente.



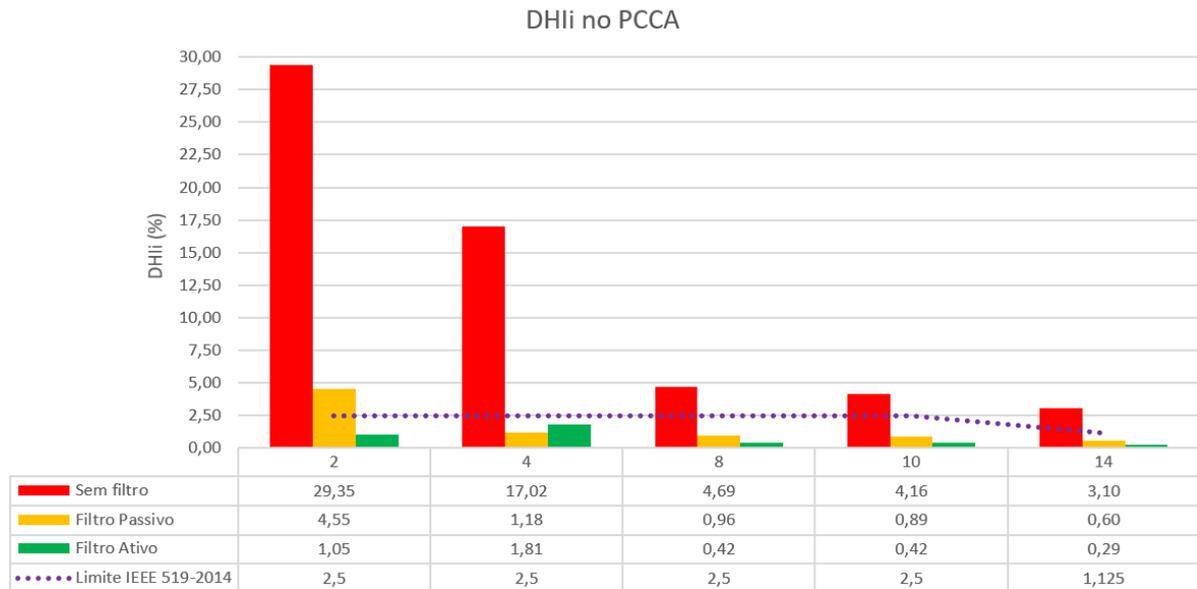
**Figura 5.9** Forma de onda e DHli no ponto PRE\_AA antes e após a inserção do filtro ativo.

Fonte: Imagem do autor.

Após mitigação das harmônicas de sequência zero, no ponto PRE\_AA, a DHTi encontrada para o sistema foi de 2,34%. A amplitude de corrente neste ponto sem a inserção do filtro era de 17,32 A, após a inserção o valor de amplitude encontrado foi de 19,74 A, houve um aumento pequeno de consumo devido à inserção do filtro ativo.

## 5.3 Discussão dos resultados

A última etapa de análise proposta trata-se da validação e avaliação técnica da melhor solução encontrada. A Figura 5.10 exibe a comparação dos resultados das DHIi obtidos após a inserção dos filtros passivo e ativo no sistema.



**Figura 5.10** Resultados obtidos de DHIi no PCC do precipitador eletrostático.

Fonte: Imagem do autor.

As duas topologias apresentaram resultado satisfatório de mitigação das distorções harmônicas de corrente individuais. Na Tabela 5.1 é disposta a comparação técnica dos filtros, demonstrando a eficiência de cada modelo.

**Tabela 5.1** Comparação técnica dos filtros passivo e ativo.

	ATP Draw®			Simulink®		
	Sistema Original	Filtro Passivo Nominal	Eficiência	Sistema Original	Filtro Ativo Nominal	Eficiência
<b>Corrente [A]</b>	280,07	877,66	-	196,7	198,1	-
<b>DHTi</b>	42,63	10,34	75,75%	44,18	22,24	49,66%
<b>DHI<sub>2</sub> [%]</b>	29,35	4,55	84,49%	29,35	1,05	96,42%
<b>DHI<sub>4</sub> [%]</b>	17,02	1,18	93,06%	17,02	1,81	89,36%
<b>DHI<sub>8</sub> [%]</b>	4,69	0,96	79,55%	4,69	0,42	91,05%
<b>DHI<sub>10</sub> [%]</b>	4,16	0,88	78,65%	4,159	0,42	89,90%
<b>DHI<sub>14</sub> [%]</b>	3,10	0,60	80,55%	3,10	0,29	90,64%

O filtro passivo apresentou um excelente resultado para a mitigação da DHTi do sistema, deixando-a de acordo com os limites estabelecidos pela norma IEEE 519-2014. Porém, aumentou a corrente na carga em aproximadamente 214%. Apesar de apresentar um resultado

satisfatório para a mitigação da DHTi, a DHIi de segunda ordem permanece ainda acima do limite estabelecido de 2,5%.

A inserção do filtro ativo fez com que todas as DHIi de sequência positiva e negativa ficassem dentro dos limites estabelecidos pela norma, entretanto, a DHTi encontrada ficou 10% acima do limite, pois a topologia escolhida não atua nas distorções de sequência zero. A corrente na carga teve um aumento de 0,7%.

# Capítulo 6

## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo analisar e comparar o desempenho de filtros de potência passivo e ativo para mitigar distorções da forma de onda (harmônicas de sequência positiva e negativa) no precipitador eletrostático que faz parte dos serviços auxiliares de uma UTE, visando adequação e atendimento as exigências da norma IEEE-519-2014.

Os filtros passivos shunt sintonizados foram modelados e simulados no software ATP Draw®, enquanto o filtro ativo shunt foi modelado e simulado no software MATLAB®, com ajuda da ferramenta Simulink®.

A modelagem da rede, na qual os filtros foram inseridos, é a representação fiel dos sistemas auxiliares de uma UTE. O ponto escolhido para analisar a mitigação das distorções harmônicas foi o ponto comum de conexão (PCC) junto ao precipitador eletrostático. O caso estudado apresenta uma forma de onda mais rara de ser encontrada nos sistemas trifásicos, pois apresenta harmônicas de ordens pares, as quais são mais difíceis de serem filtradas, o que torna mais interessante o estudo de mitigação de distorções neste ponto. O fato de apresentar harmônicas pares evidencia a assimetria que a forma de onda exibe, ou seja, os semi-ciclos positivos são diferentes dos semi-ciclos negativos.

O filtro passivo desenvolvido para mitigar as distorções ao máximo e não houve preocupação com o consumo durante o dimensionamento, por este motivo foram associados os filtros passivos de ordem 2 e 4, os quais foram sintonizados exatamente nas frequências harmônicas. Logo, foi comprovado, através da simulação, que a presença de mais de um filtro na mesma rede produz interferências e ressonâncias mútuas. Este tipo de filtro oferece robustez, alta confiabilidade, insensibilidade a surtos, menor custo de projeto e operação silenciosa, todavia são pesados e volumosos, perdem a sintonia caso haja mudança na carga e afetam as formas de onda na frequência fundamental, como foi comprovado nas simulações. Além disso, uma desvantagem a ser considerada desta topologia é a dificuldade no correto dimensionamento do filtro, visto que este deve ser dimensionado de forma a mitigar as distorções, mas não afetar o consumo do sistema.

Cada topologia apresenta vantagens e desvantagens, e não existe uma solução genérica que possa ser aplicada em qualquer caso em se tratando de mitigação de harmônicas, por este motivo, escolheu-se as topologias que melhor funcionariam para o sistema estudado. O filtro ativo foi desenvolvido para mitigar as distorções de sequência positiva e negativa. As harmônicas de sequência zero foram desconsideradas pois o sistema já continha um

transformador que as mitigava.

Utilizou-se a topologia com um inversor de três braços, o qual é apropriado para sistemas trifásicos equilibrados. O controle das correntes foi feito por um controlador de histerese, o qual apresenta como vantagem a robustez e resposta instantânea, ou seja, a corrente sintetizada está sempre acompanhando a corrente de referência. Este tipo de filtro oferece boa eficácia, média confiabilidade, boa resposta dinâmica e são menos volumosos. Porém, o custo de projeto é maior. Um ponto importante observado durante as simulações é que o resultado da compensação é diretamente proporcional às condições de operação da carga, uma vez que o filtro é projetado para uma determinada condição nominal. Sendo assim, o estudo do tipo de carga a ser compensada é fundamental para o correto dimensionamento deste filtro.

Com base nas simulações das duas topologias, escolheu-se como melhor resultado a topologia do filtro ativo shunt pois, a inserção do filtro no sistema não causou um aumento de consumo significativo e mitigou as distorções harmônicas de forma satisfatória. A DHTi encontrada para o sistema, após a inserção do filtro ativo associado ao transformador já existente, foi de 2,34%.

Por fim, como continuidade desta pesquisa sugere-se: (i) utilizar um método iterativo para desenvolver o filtro passivo, com o intuito de maximizar a mitigação de distorções harmônicas de corrente e de minimizar o consumo do filtro; (ii) utilizar a teoria PQ para obtenção das correntes de referência no filtro ativo, a fim de verificar se a mesma apresentaria um resultado melhor do que a teoria empregada nesta pesquisa; (iii) utilizar uma topologia de filtro ativo capaz de mitigar as distorções harmônicas de sequência zero, a fim de verificar se esta topologia apresenta superioridade à topologia empregada nesta pesquisa e (iv) utilizar um filtro híbrido de potência a fim de verificar se o mesmo terá um melhor resultado do que os filtros passivo e ativo aqui propostos.

# Referências Bibliográficas

- Abdel Aleem, S. H. E., Zobaa, A. F., & Balci, M. E. (2017). Optimal resonance-free third-order high-pass filters based on minimization of the total cost of the filters using Crow Search Algorithm. *Electric Power Systems Research, 151*, 381–394. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.06.009>
- Ando Junior, O. H. (2009). Desenvolvimento de uma metodologia para identificar e quantificar distúrbios da qualidade da energia elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- ANEEL, A. N. de E. E. (2021). PRODIST - Módulo 8 - Qualidade, 1–88.
- Antunes, H. M. A. (2009). Análise Comparativa entre Filtros Híbridos Aplicados a Cicloconversores em uma Siderúrgica.
- Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power System Harmonics* (Second). England: John Wiley & Sons Ltd. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17190-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17190-6_1)
- Asiminoaei, L., Wiechowski, W., Blaabjerg, F., Krzeszowiak, T., & Kedra, B. (2006). A new control structure for hybrid power filter to reduce the inverter power rating. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2712–2717. <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347853>
- Balasubramanian, R., & Palani, S. (2016). Simulation and performance evaluation of shunt hybrid power filter for power quality improvement using PQ theory. *International Journal of Electrical and Computer Engineering, 6*(6), 2603–2609. <https://doi.org/10.11591/ijece.v6i6.12011>
- Bhattacharjee, K. (2014). Harmonic mitigation by SRF theory based active power filter using adaptive hysteresis control. In *2014 Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, PESTSE 2014*. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2014.6805317>
- Bollen, M. H. J. (2010). *Understanding Power Quality Problems: Voltage sags and interruptions*. Hoboken: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1109/9780470546840>
- Crepaldi, J., Amoroso, M. M., & Ando Junior, O. H. (2018). Analysis of the topologies of power filters applied in distributed generation units-Review. *IEEE Latin America Transactions, 16*(7), 1892–1897. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.8447354>
- Das, J. C. (2004). Passive Filters - Potentialities and Limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications, 40*(1), 232–241. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821666>
- Deckmann, S. M., & Pomilio, J. A. (2018). Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica. *Universidade Estadual de Campinas, 15*. Retrieved from [www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012](http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012)
- Delmont, O. F. (2003). Utilização Da Transformada Wavelet Para Caracterização De Distúrbios Na Qualidade Da Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Diniz, R. A. (2014). Compensação Distribuída Série na Mitigação Harmônica em Instalações Comerciais. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo*

- Horizonte, Minas Gerais*. Retrieved from <http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1017M.PDF>
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2002). *Electrical Power Systems Quality* (Second). McGraw-Hill.
- EN 50160. (2008). Voltage Characteristic of Electricity Supplied by Public Distribution Networks. Retrieved from [www.cda.org.uk](http://www.cda.org.uk); [www.brass.org](http://www.brass.org); [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org);
- Ferreira, C. G. (2008). Análise De Um Filtro Ativo Em Paralelo Com Ciclonversores E Filtro Passivo. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Espírito Santo. Vitória, Espírito Santo*.
- Freitas, S. C. L. de. (2011). Supressor Eletromagnético de Componentes Harmônicas de Sequência Zero. *Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil*.
- Hamad, M. S., Ahmed, K. H., & Madi, A. I. (2017). Current harmonics mitigation using a modular multilevel converter-based shunt active power filter. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2016* (pp. 755–759). <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884436>
- IEC 61000-2-2. (2002). Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems.
- IEC 61000-3-6. (2008). Technical Report Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, *40*(1), 179–182.
- IEEE. (2014). IEEE 519 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society, *2014*, 29.
- IEEE 1159. (2009). *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)* (Vol. 2009). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>
- Jeraldine Viji, A., & Aruldoss Albert Victoire, T. (2014). Enhanced PLL based SRF control method for UPQC with fault protection under unbalanced load conditions. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *58*, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.01.039>
- Kassick, E. V. (2008). Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão. Apostila.
- Leão, R., Antunes, F., & Sampaio, R. (2014). *Harmônicos em Sistemas Elétricos*. Elsevier Brasil.
- Lee, T.-L., Wang, Y.-C., Li, J.-C., & Guerrero, J. M. (2015). Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *62*(2), 746–756. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2347008>
- Lima, C. H. de O. (2017). Controle de Harmônicos e Potência Reativa em Cargas Desbalanceadas Utilizando um Filtro Híbrido Trifásico Dual Baseado no Inversor Nove-Chaves . Recife Fevereiro de 2017 Calebe Hermann de Oliveira Lima Controle de Harmônicos e Potência Reativa em Cargas D. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
- Limongi, L. (2006). Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente

- e Potência Reativa. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil. Retrieved from <http://en.scientificcommons.org/20197829>
- Meira, C. R. de. (2009). Desempenho de um Precipitador Eletrostático Operando na Remoção de Nanopartículas de Aerossóis. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo.*, 123. Retrieved from <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4029/2673.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mercedes, S. S. P., Rico, J. A. P., & Pozzo, L. D. Y. (2015). Uma revisão histórica do planejamento do setor elétrico brasileiro. *Revista USP*, (104), 13. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i104p13-36>
- Nascimento, R. P. (2007). Propostas de Procedimentos para Projetar Filtros Harmônicos a partir de um Programa de Penetração Harmônica, Incluindo Cálculos de Desempenho de Suportabilidade. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. Brasil.
- Nassif, A. B., & Xu, W. (2007). Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis. In *2007 39th North American Power Symposium* (pp. 301–307). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2007.4402326>
- Panigrahi, R., Subudhi, B., & Panda, P. C. (2016). A robust LQG servo control strategy of shunt-active power filter for power quality enhancement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(4), 2860–2869. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2456155>
- Pimentel, R., & Wazen, R. N. (2016). DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES. *TecnoEng. ISSN: 2358-2669/Vol.1 Nº13*, pp. 217–227.
- Pires, I. A. (2010). Medidas de mitigação de harmônicos. In *O Setor Elétrico* (pp. 38–47).
- Pomalis, M. P. C. da S. (2014). Proposta de modelagem e simulação para análise de distorção harmônica. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, Rio Grande Do Sul, Brasil.*, 145.
- Pomilio, J. A. (2010). Soluções Passivas. Retrieved from <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpCAP5/cap5.html>
- Saidi, S., Abbassi, R., & Chebbi, S. (2016). Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 30(6), 809–823. <https://doi.org/10.1002/acs.2637>
- Santos, A., Schenatto, F., & Oliveira, G. (2017). Metodologia PROKNOW-C para construir o conhecimento acerca de previsão de demanda utilizando séries temporais PROKNOW-C. *VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, (Ponta Grossa, Paraná, Brasil).
- Satpathy, S., & Bebart, S. S. (2013). Power quality improvement in 3-Phase system using shunt active filter, 45.
- Silva, N. (2012). Contribuições ao Estudo, Projeto e Aplicação de Filtros Ativos Híbridos de Potência. UNICAMP. Campinas. Brasil. Retrieved from [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260365/1/Silva\\_Newtonda\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260365/1/Silva_Newtonda_D.pdf)
- Silva, P. V., Pinheiro, R. F., Aguiar, M. V., Junior, L. P., Salazar, A. O., & Cunha, C. D. (2011). Implementation of a shunt active filter using the Theory of Generalized Instantaneous Power. *COBEP 2011 - 11th Brazilian Power Electronics Conference*, (April 2015), 782–787. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085306>

- Silviera, R. F., & Pereira, A. L. S. (2013). Estudo sobre Técnica de Controle Utilizadas em Filtros Ativos de Potência. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí. Brasil.
- Singh, S., & Singh, B. (2014). Optimized passive filter design using modified particle swarm optimization algorithm for a 12-pulse converter-fed LCI-synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(4), 2681–2689. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2292991>
- Souza, O. C., & Figueiredo da Silva, S. (2013). Comparação entre métodos de sintonia de controlador pid em malha de controle de pressão. Instituto Federal Fluminense. Campos dos Goytacazes. Brasil.
- Tali, M., Obbadi, A., Elfajri, A., & Errami, Y. (2014). Passive filter for harmonics mitigation in standalone PV system for non linear load. In E. M. & Z. Y. (Eds.), *2014 2nd International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2014* (pp. 499–504). Laboratory: Electronics, Instrumentation and Energy Team: Exploitation and Processing of Renewable Energy, Faculty of Science University Chouaib Doukkali Department of Physics, El-Jadida, 24000, Morocco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2014.7059834>
- Tareen, W. U. K., & Mekhief, S. (2018). Three-Phase Transformerless Shunt Active Power Filter with Reduced Switch Count for Harmonic Compensation in Grid-Connected Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6), 4868–4881. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2728602>
- Troncha, G. S., Santos, I. N., Souza, A. C., Azevedo Jr, C. R., & Moura, L. P. (2018). Filtros Ativos Shunt : Estado Da Arte , Desafios E Tendências Shunt Active Power Filters : XVI CEEL - ISSN 2178-8308.
- Valdez-Fernandez, A. A., Escobar, G., Martinez-Rodriguez, P. R., Sosa, J. M., Campos-Delgado, D. U., & Lopez-Sanchez, M. J. (2017). Modelling and control of a hybrid power filter to compensate harmonic distortion under unbalanced operation. *IET Power Electronics*, 10(7), 782–791. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0263>
- Watanabe, E., & Aredes, M. (1998). Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações—filtros ativos e FACTS. *XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia*, 1–21. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Teoria+de+Potência+Ativa+e+Reativa+Instantânea+e+Aplicações+—+Filtros+Ativos+e+FACTS+—#0>
- Yilmaz, I., Durna, E., & Ermiş, M. (2015). Design and implementation of a hybrid system for the mitigation of PQ problems of medium-frequency induction steel-melting furnaces. In *51st Annual Meeting on IEEE Industry Application Society, IAS 2015*. Middle East Technical University, Electrical and Electronics Eng. Dept., Ankara, TR 06800, Turkey: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IAS.2015.7356883>

# Apêndice A

**Tabela A.1** Portfólio bibliográfico feito a partir do método ProKnow-C para filtros de potência ativos.

Título	Breve Resumo	Referência
Harmonic mitigation by SRF theory based active power filter using adaptive hysteresis control	Este artigo comprova a eficácia do uso de um filtro de potência ativo shunt trifásico (três fios) baseado no controle adaptativo da corrente de histerese e na teoria SRF (Synchronous Reference Frame) utilizado para mitigar distorções harmônicas na rede elétrica.	(Bhattacharjee, 2014)
Enhanced PLL based SRF control method for UPQC with fault protection under unbalanced load conditions	Este artigo apresenta uma nova estratégia de controle para um filtro UPQC (combinação de filtro ativos série e paralelo que compartilham o mesmo capacitor de barramento).	(Jeraldine Viji & Aruldoss Albert Victoire, 2014)
Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power	Este artigo propõe o uso de um inversor de três níveis como um filtro de potência ativo, que utiliza um controlador lógico difuso para minimizar as comutações dos interruptores. Os resultados obtidos comprovaram a eficácia do uso deste método para mitigar distorções harmônicas na rede elétrica.	(Saidi, Abbassi, & Chebbi, 2016)
A robust LQG servo control strategy of shunt-active power filter for power quality enhancement	Este artigo propõe um controlador LQG (gaussiano quadrático linear) para controlar um filtro de potência ativo shunt operando tanto com tensão balanceada quanto desbalanceada. Esta estratégia exibe um desempenho superior em termos de robustez e melhorias de mitigação de harmônicos quando comparado às aplicações baseadas em LQR (Linear Quadratic Regulator) .	(Panigrahi, Subudhi, & Panda, 2016)
Current harmonics mitigation using a modular multilevel converter-based shunt active power filter	Este artigo apresenta o uso de um filtro de potência ativo shunt conectado a uma carga não linear de tensão média para compensar a oscilação de potência da rede e também mitigar distorções harmônicas da corrente de alimentação do sistema.	(Hamad, Ahmed, & Madi, 2017)

**Tabela A.2** Portfólio bibliográfico feito a partir do método ProKnow-C para filtros de potência passivos.

<b>Título</b>	<b>Breve Resumo</b>	<b>Referência</b>
Optimal resonance-free third-order high-pass filters based on minimization of the total cost of the filters using Crow Search Algorithm	Este artigo apresenta um filtro passa alta amortecido de terceira ordem livre de ressonância, que é obtido através do algoritmo “Crow Search”. Este algoritmo é utilizado visando minimizar os custos de projeto dos filtros.	(Abdel Aleem, Zobaa, & Balci, 2017)
Passive Filters - Potentialities and Limitations	Este artigo discute as principais diferenças de aplicações e limitações de duas topologias de filtros passivos muito utilizadas (passa banda e amortecidos).	(Das, 2004)
Passive filter for harmonics mitigation in standalone PV system for non linear load	Este artigo apresenta uma análise entre três topologias de filtros passivos (passa banda sintonizado, passa alta e filtro composto) para minimizar a distorção harmônica causada por cargas lineares em um sistema fotovoltaico autônomo.	(Tali, Obbadi, Elfajri, & Errami, 2014)
Optimized passive filter design using modified particle swarm optimization algorithm for a 12-pulse converter-fed LCI-synchronous motor drive	Este artigo apresenta um algoritmo capaz de projetar filtros passivos que são utilizados para reduzir o fator de potência e a distorção de harmônicos na rede elétrica.	(Singh & Singh, 2014)

**Tabela A.3** Portfólio bibliográfico feito a partir do método ProKnow-C para filtros de potência híbridos.

<b>Título</b>	<b>Breve Resumo</b>	<b>Referência</b>
Simulation and Performance Evaluation of Shunt Hybrid Power Filter for Power Quality Improvement Using PQ Theory	Este artigo propõe o projeto de filtro híbrido shunt composto por uma combinação paralela de filtros passivos sintonizados na 5ª e 7ª harmônica, os quais são conectados em série com um pequeno inversor de fonte de tensão IGBT.	(Balasubramanian & Palani, 2016)
Hybrid Active Filter With Variable Conductance for Harmonic Resonance Suppression in Industrial Power Systems	Este artigo apresenta um filtro ativo híbrido para suprimir a ressonância e a distorção harmônica. O filtro híbrido é composto por um filtro passivo sintonizado na sétima harmônica e um filtro ativo conectado em série, ambos dc.	(Lee, Wang, Li, & Guerrero, 2015)
Three-Phase Transformerless Shunt Active Power Filter With Reduced Switch Count for Harmonic Compensation in Grid-Connected Applications	Neste artigo é proposta uma nova topologia de um filtro híbrido ativo em derivação utilizando um VSI de quatro comutadores. A topologia proposta aprimora a capacidade de compensação harmônica e fornece compensação completa da potência reativa em comparação com topologias convencionais.	(Tareen & Mekhief, 2018)
A Model-based Controller for a Hybrid Power Filter to Compensate Harmonic Distortion in Unbalanced Operation	Este artigo apresenta um filtro híbrido para reduzir a distorção harmônica atual em um sistema de energia trifásico. A topologia do filtro híbrido é composta por um filtro ativo conectado à rede por meio de um filtro passivo LC. O objetivo dessa topologia é reduzir a classificação atual tratada pelo inversor de fonte de tensão do filtro ativo (VSI).	(Valdez-Fernandez et al., 2017)
Design and Implementation of a Hybrid System for the Mitigation of PQ Problems of Medium-Frequency Induction Steel-Melting Furnaces	Este artigo descreve um sistema híbrido para mitigação dos problemas de QEE da frequência média nos fornos de indução para a fusão de aços. O sistema híbrido é composto de filtros passivos com desvio de derivação e um filtro de potência ativo híbrido. Este filtro opera mitigando harmônicas com sucesso desde março de 2013.	(Yilmaz, Durna, & Ermiş, 2015)

# Apêndice B

**Tabela B.1** Distorção harmônica de tensão encontrada no ponto PCCA.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DHIv (%)</b>
60	1	355,08600	-
120	2	3,45089	0,971846
180	3	2,78272	0,783675
240	4	4,20098	1,183088
300	5	3,49276	0,983638
360	6	2,25135	0,63403
420	7	2,79932	0,78835
480	8	2,37258	0,668171
540	9	1,95903	0,551706
600	10	2,65010	0,746326
660	11	2,79487	0,787097
720	12	2,42700	0,683496
780	13	2,87836	0,810609
840	14	3,16371	0,89097
900	15	2,55472	0,719465
960	16	0,62246	0,175298
1020	17	0,26433	0,074442
1080	18	0,07382	0,02079
1140	19	0,19598	0,055192
1200	20	0,23245	0,065464
1260	21	0,08082	0,02276
1320	22	0,14881	0,041907
1380	23	0,13703	0,038591
1440	24	0,40072	0,112851
1500	25	0,63316	0,178312
1560	26	0,16804	0,047324
1620	27	0,20199	0,056884
1680	28	0,20068	0,056516

1740	29	0,17844	0,050252
1800	30	0,29741	0,083756
DHT <sub>v</sub> (%)			3,069685258

# Apêndice C

**Tabela C.1** Distorção harmônica de corrente encontrada no ponto PCCA.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>ii</sub> (%)</b>
60	1	280,07100	-
120	2	82,20720	29,35227
180	3	53,70490	19,17546
240	4	47,67380	17,02204
300	5	27,80770	9,928804
360	6	21,14720	7,550657
420	7	15,08540	5,386277
480	8	13,14570	4,693703
540	9	11,87510	4,240032
600	10	11,64840	4,159088
660	11	10,46460	3,73641
720	12	9,73614	3,476311
780	13	9,40410	3,357756
840	14	8,68235	3,100053
900	15	8,38628	2,994341
960	16	1,04799	0,374187
1020	17	0,85364	0,304793
1080	18	0,70540	0,251866
1140	19	0,57000	0,203519
1200	20	0,48866	0,174475
1260	21	0,47508	0,16963
1320	22	0,58163	0,207671
1380	23	0,38254	0,136588
1440	24	0,39018	0,139315
1500	25	0,65409	0,233546
1560	26	0,20258	0,072331
1620	27	0,54278	0,193801
1680	28	0,20866	0,074503

1740	29	0,380413	0,135827
1800	30	0,278332	0,099379
DHTi (%)			42,63123306

# Apêndice D

**Tabela D.1** Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PRE\_AA.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>i</sub> (%)</b>
60	1	21,002900	-
120	2	5,945530	28,30814
180	3	0,101070	0,481219
240	4	3,434260	16,35136
300	5	2,006660	9,554204
360	6	0,021180	0,100842
420	7	1,082750	5,15524
480	8	0,954715	4,545634
540	9	0,013831	0,065854
600	10	0,828513	3,944755
660	11	0,752402	3,582372
720	12	0,029219	0,139118
780	13	0,652791	3,108099
840	14	0,604114	2,876336
900	15	0,051626	0,245804
960	16	0,031147	0,148297
1020	17	0,026540	0,126362
1080	18	0,027305	0,130007
1140	19	0,021237	0,101115
1200	20	0,015932	0,075857
1260	21	0,015906	0,075734
1320	22	0,025145	0,119719
1380	23	0,009140	0,043519
1440	24	0,019449	0,092602
1500	25	0,027192	0,129468
1560	26	0,011042	0,052571
1620	27	0,029603	0,140947
1680	28	0,004285	0,020402

1740	29	0,012333	0,058718
1800	30	0,012842	0,061143
DHTi (%)			35,41245712

# Apêndice E

Para o cálculo do desempenho do filtro é necessário calcular a corrente da frequência fundamental (IF1), através da equação (E.1).

$$IF_1 = \frac{VS}{X_C - X_L} \quad (\text{E.1})$$

Onde,

VS – tensão sobre o filtro;

$X_C$  – reatância capacitiva na frequência fundamental;

$X_L$  – reatância indutiva na frequência fundamental.

Os valores encontrados podem ser vistos na Tabela E.1.

**Tabela E.1** Corrente da frequência fundamental dos filtros de ordem h.

Ordem 2	$IF_1 = 418,7402973 \text{ A}$
Ordem 4	$IF_1 = 241,8729791 \text{ A}$
Ordem 8	$IF_1 = 67,24003461 \text{ A}$

Calculada a corrente IF, é possível calcular as tensões pertinentes ao capacitor. A tensão no capacitor na frequência fundamental é dada pela equação (E.2) enquanto a tensão das harmônicas no capacitor é dada pela equação (E.3) e a tensão nominal no capacitor (VR) é a soma das duas tensões anteriores.

$$VC_1 = IF_1 * X_C \quad (\text{E.2})$$

$$V_{CH} = \sum I_{FH} * \frac{X_C}{H} \quad (\text{E.3})$$

Os valores das tensões no capacitor podem ser vistos na Tabela E.2.

**Tabela E.2** Tensões no capacitor dos filtros de ordem h.

Ordem 2	$VC_1 = 351,3651983 \text{ V}$
---------	--------------------------------

	$V_{C_H} = 4,035731954 V$
	$VR = 355,4009303 V$
	$VC_1 = 272,9354665 V$
Ordem 4	$V_{C_H} = 5,427263991 V$
	$VR = 278,3627305 V$
	$VC_1 = 258,5097019 V$
Ordem 8	$V_{C_H} = 18,49086575 V$
	$VR = 277,0005677 V$

A tensão de fase do capacitor deverá ser coerente com a tensão nominal (VR), lembrando que um capacitor poderá operar continuamente com uma sobretensão limite de até 10% sobre a tensão nominal. A real potência reativa trifásica (QR) do filtro é dada pela equação (E.4).

$$Q_R = \frac{(\sqrt{3} * V_R)^2}{X_C} \quad (E.4)$$

Os valores da potência reativa trifásica real do filtro podem ser vistos na **Tabela E.3**.

**Tabela E.3** Potência reativa trifásica real dos filtros de ordem h.

Ordem 2	$Q_R = 451,590 kVar$
Ordem 4	$Q_R = 206,0017 kVar$
Ordem 8	$Q_R = 59,87336 kVar$

As equações (E.5) e (E.6) demonstram como calcular a corrente total RMS e a corrente nominal do filtro, respectivamente.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{H=1}^{Hmáx} I_H^2} \quad (E.5)$$

$$I_{NOM} = \frac{Q_R}{3 * V_R} \quad (E.6)$$

Os valores das correntes no capacitor dos filtros podem ser visto na **Tabela E.4**.

**Tabela E.4** Correntes no capacitor dos filtros de ordem h.

Ordem 2	$I_{RMS} = 418,8063456 A$
	$I_{NOM} = 423,5498903 A$
Ordem 4	$I_{RMS} = 241,8729791 A$
	$I_{NOM} = 246,6825721 A$
Ordem 8	$I_{RMS} = 67,24003461 A$
	$I_{NOM} = 72,04962761 A$

Segundo Leão et al., 2014, a corrente total RMS que flui através do filtro deve ser menor que 135% da corrente nominal do capacitor, e mantida dentro da capacidade do fusível de proteção do sistema, para que o filtro tenha um bom desempenho. Os resultados deste teste de desempenho podem ser vistos na **Tabela E.5**.

**Tabela E.5** Resultados do teste de desempenho do filtro – corrente.

Ordem 2	$I_{RMS} < 1,35I_{NOM}$
	$418,806 < 571,792352$
Ordem 4	$I_{RMS} < 1,35I_{NOM}$
	$241,8729 < 333,0214724$
Ordem 8	$I_{RMS} < 1,35I_{NOM}$
	$67,240 < 97,26699728$

Além de verificar as correntes do capacitor, é necessário avaliar o aquecimento dielétrico do capacitor do filtro harmônico, o valor máximo aceitável é dado pela inequação (E.7).

$$\left| \sum_H V_H * I_H \right| \leq 1,35Q_R \quad (E.7)$$

Os resultados da avaliação do aquecimento dielétrico do capacitor dos filtros podem ser vistos na **Tabela E.6**.

**Tabela E.6** Resultado da avaliação de aquecimento dielétrico do capacitor dos filtros de ordem  $h$ .

Ordem 2	$147,149 k \leq 609,6466 k$
Ordem 4	$66,0404 k \leq 278,102 k$
Ordem 8	$17,46637 k \leq 80,829 k$

Como os valores de aquecimento dielétrico do capacitor do filtro harmônico atenderam ao valor máximo aceitável, conclui-se o bom desempenho dos filtros projetados, os quais agora podem ser inseridos no sistema, para serem simulados.

# Apêndice F

**Tabela F.1** Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com o filtro de ordem 2.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>i</sub> (%)</b>
60	1	522,68700	-
120	2	37,04560	7,08753
180	3	46,44020	8,884897
240	4	41,78660	7,994574
300	5	24,05530	4,602238
360	6	19,09750	3,653716
420	7	13,15440	2,516688
480	8	11,69580	2,23763
540	9	10,74810	2,056317
600	10	10,44230	1,997811
660	11	9,30320	1,77988
720	12	8,44433	1,615562
780	13	8,55004	1,635786
840	14	7,47330	1,429785
900	15	7,95443	1,521834
960	16	1,29516	0,247789
1020	17	0,61638	0,117925
1080	18	0,54221	0,103735
1140	19	0,46951	0,089827
1200	20	0,20686	0,039576
1260	21	0,25230	0,04827
1320	22	0,62362	0,119311
1380	23	0,41487	0,079373
1440	24	0,18063	0,034559
1500	25	1,52566	0,291888
1560	26	0,25882	0,049518
1620	27	0,40179	0,07687

1680	28	0,16494	0,031557
1740	29	0,43595	0,083406
1800	30	0,27445	0,052508
DHTi (%)			16,13123

# Apêndice G

**Tabela G.1** Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com o filtro de ordem 4.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>i</sub> (%)</b>
60	1	307,98600	-
120	2	93,49970	30,35843
180	3	94,76260	30,76848
240	4	11,10430	3,605456
300	5	14,20040	4,610729
360	6	14,72510	4,781094
420	7	9,60375	3,118242
480	8	9,26951	3,009718
540	9	9,00079	2,922467
600	10	8,51818	2,765769
660	11	7,47883	2,428302
720	12	7,34139	2,383677
780	13	7,01870	2,278902
840	14	6,14582	1,995487
900	15	6,67912	2,168644
960	16	0,95432	0,309858
1020	17	0,53951	0,175173
1080	18	0,48114	0,156221
1140	19	0,39599	0,128575
1200	20	0,21883	0,071053
1260	21	0,30998	0,100648
1320	22	0,35238	0,114414
1380	23	0,19741	0,064097
1440	24	0,17989	0,058407
1500	25	0,65348	0,212177
1560	26	0,19956	0,064795
1620	27	0,43759	0,142082

1680	28	0,06252	0,020298
1740	29	0,19315	0,062713
1800	30	0,06234	0,020242
DHTi (%)			44,56632

# Apêndice H

**Tabela H.1** Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com o filtro de ordem 8.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>i</sub> (%)</b>
60	1	243,20000	-
120	2	83,80790	34,46049
180	3	55,81430	22,94996
240	4	52,53050	21,59971
300	5	33,47810	13,76567
360	6	25,86500	10,63528
420	7	23,18720	9,534211
480	8	23,15920	9,522697
540	9	23,07020	9,486102
600	10	44,02440	18,10214
660	11	118,31600	48,64967
720	12	140,67500	57,84334
780	13	21,70290	8,92389
840	14	13,97330	5,7456
900	15	8,88407	3,652989
960	16	2,95591	1,215424
1020	17	2,27393	0,935004
1080	18	1,99668	0,821003
1140	19	1,64181	0,675086
1200	20	1,59179	0,654519
1260	21	1,28252	0,527352
1320	22	0,99711	0,409995
1380	23	1,06560	0,438158
1440	24	0,89139	0,366524
1500	25	0,79856	0,328353
1560	26	0,99567	0,409403
1620	27	0,84414	0,347098

1680	28	0,79665	0,327569
1740	29	0,61897	0,25451
1800	30	1,00251	0,412216
DHTi (%)			94,48115

# Apêndice I

**Tabela I.1** Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PCCA com os filtros de ordem 2 e 4.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>i</sub> (%)</b>
60	1	877,66400	-
120	2	39,95040	4,551901
180	3	75,57750	8,611211
240	4	10,36070	1,180486
300	5	12,74210	1,45182
360	6	13,57730	1,546982
420	7	8,48414	0,966673
480	8	8,42570	0,960014
540	9	8,26699	0,941931
600	10	7,79254	0,887873
660	11	6,77339	0,771752
720	12	6,31582	0,719617
780	13	6,53534	0,744629
840	14	5,29084	0,602832
900	15	6,51801	0,742654
960	16	1,41115	0,160785
1020	17	0,48234	0,054958
1080	18	0,36775	0,041901
1140	19	0,36817	0,041949
1200	20	0,15070	0,01717
1260	21	0,08815	0,010043
1320	22	1,09987	0,125318
1380	23	0,78855	0,089847
1440	24	0,19286	0,021974
1500	25	2,91852	0,332533
1560	26	0,39357	0,044843
1620	27	0,50982	0,058088

1680	28	0,34176	0,03894
1740	29	0,79504	0,090586
1800	30	0,62672	0,071407
DHTi (%)			10,34744

# Apêndice J

**Tabela J.1** Distorção harmônica da corrente encontrada no ponto PRE\_AA com os filtros de ordem 2 e 4.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Harmônica</b>	<b>Amplitude (A)</b>	<b>DH<sub>i</sub> (%)</b>
60	1	61,43980	-
120	2	3,21319	5,229818
180	3	0,20335	0,330981
240	4	0,67383	1,096732
300	5	1,02219	1,663726
360	6	0,11289	0,183736
420	7	0,58160	0,946624
480	8	0,64971	1,057473
540	9	0,07429	0,120921
600	10	0,51685	0,84123
660	11	0,50664	0,824607
720	12	0,05495	0,089443
780	13	0,42798	0,696578
840	14	0,38097	0,620075
900	15	0,07519	0,122379
960	16	0,07836	0,127545
1020	17	0,03286	0,053489
1080	18	0,02366	0,038507
1140	19	0,02214	0,03603
1200	20	0,01521	0,02476
1260	21	0,01769	0,028795
1320	22	0,09922	0,161486
1380	23	0,06014	0,09788
1440	24	0,02878	0,046834
1500	25	0,21317	0,346961
1560	26	0,01567	0,025512
1620	27	0,03547	0,057728

1680	28	0,03166	0,051524
1740	29	0,08140	0,132488
1800	30	0,05014	0,081607
DHTi (%)			5,99890

# ANEXO A

IEEE Std 1159-2009  
IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality

**Table 2—Categories and typical characteristics of power system electromagnetic phenomena (see note)**

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 $\mu$ s rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu <sup>a</sup>
1.2.2 Medium frequency	5–500 kHz	20 $\mu$ s	0–8 pu
1.2.3 High frequency	0.5–5 MHz	5 $\mu$ s	0–4 pu
2.0 Short-duration root-mean-square (rms) variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles – 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 cycles – 3 s	0.1–0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles – 3 s	1.1–1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		>3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		>3 s – 1 min	0.1–0.9 pu
2.3.3 Swell		>3 s – 1 min	1.1–1.2 pu
3.0 Long duration rms variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8–0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1–1.2 pu
3.4 Current overload		> 1 min	
4.0 Imbalance			
4.1 Voltage		steady state	0.5–2%
4.2 Current		steady state	1.0–30%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0–0.1%
5.2 Harmonics	0–9 kHz	steady state	0–20%
5.3 Interharmonics	0–9 kHz	steady state	0–2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broadband	steady state	0–1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7% 0.2–2 P <sub>st</sub> <sup>b</sup>
7.0 Power frequency variations		< 10 s	$\pm$ 0.10 Hz

NOTE—These terms and categories apply to power quality measurements and are not to be confused with similar terms defined in IEEE Std 1366™-2003 [B27] and other reliability-related standards, recommended practices, and guides.

<sup>a</sup> The quantity *pu* refers to *per unit*, which is dimensionless. The quantity 1.0 pu corresponds to 100%. The nominal condition is often considered to be 1.0 pu. In this table, the nominal peak value is used as the base for transients and the nominal rms value is used as the base for rms variations.

<sup>b</sup> Flicker severity index P<sub>st</sub> as defined in IEC 61000-4-15:2003 [B15] and IEEE Std 1453™-2004 [B28].

## ANEXO B

Trafo do PRECIPITADOR	
Número de fases	3
Número de enrolamentos	2
Frequência	60 Hz
Tensão linha-linha (Alta)	6.3 kV
Tensão linha-linha (Baixa)	0.440 kV
Potência	1 MVA
Conexão	D -Y (30°)
<u>Dados Ensaio – Circuito Aberto:</u>	
Tensão (%)	100
Corrente (%)	1.1
Perdas	2.53
<u>Dados Ensaio – Curto-Circuito:</u>	
Impedância (%)	6.34
Potência (MVA)	1
Perdas (kW)	10.28

Dados fornecidos pela Tractebel Energia. Data do ensaio: 07.11.06 por WEG SA

Fonte: (Pomalis, 2014)