



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

LARA DE LIMA BRAZ

**ANÁLISE HARMÔNICA DE REDES ELÉTRICAS UTILIZANDO O SOFTWARE
PCFLO**

Uberlândia

2017

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

LARA DE LIMA BRAZ

**ANÁLISE HARMÔNICA DE REDES ELÉTRICAS UTILIZANDO O SOFTWARE
PCFLO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Wilson Resende

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2017

LARA DE LIMA BRAZ

**ANÁLISE HARMÔNICA DE REDES ELÉTRICAS UTILIZANDO O SOFTWARE
PCFLO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 14 de julho de 2017

Banca examinadora

Prof. Dr. Antônio Carlos Delaiba

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior

Prof. Dr. José Wilson Resende

Uberlândia
2017

Dedico este trabalho aos meus pais Elter e Helena.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo cuidado e sustento em todas as coisas.

Ao Prof. José Wilson Resende, pela orientação neste trabalho, sendo prestativo e auxiliando em todo o tempo.

À minha família, por todo o incentivo e cuidado prestados.

Ao Lorenço Santos Vasconcelos, pelo companheirismo e amor a cada momento.

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise harmônica de redes elétricas utilizando o *software* PCFLO, pelo qual são desenvolvidos estudos de penetração harmônica e análise da impedância harmônica de barras de sistemas. Também propõe soluções para a diminuição das distorções harmônicas, que consistem em filtros harmônicos passivos sintonizados inseridos em paralelo à rede. Esses são dimensionados visando atender valores recomendados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em seu documento Procedimentos de Distribuição (PRODIST) – Módulo 8. Ainda, esta monografia traz uma revisão bibliográfica geral do assunto Distorções Harmônicas, desde seus fundamentos, cargas geradoras, efeitos causados na rede, regulamentação nacional e internacional que rege o assunto e métodos de mitigação. Por fim, o apêndice apresenta instruções de utilização do programa PCFLO referentes ao estudo de penetração harmônica e análise da impedância harmônica.

Palavras-chave: distorção harmônica, PCFLO, análise harmônica, filtros harmônicos, impedância harmônica.

ABSTRACT

This work presents the harmonic analysis of electrical networks using PCFLO software, where system harmonic power flow studies and harmonic impedance analysis were carried out. It also suggests mitigation techniques for harmonic distortions reduction which consist on passive tuned harmonic filters in parallel to the network. These filters are designed in order to achieve the limits published by the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL). This monograph also provides a theoretical background on Harmonic Distortions. Finally, the appendix presents instructions for using the PCFLO program for both Full Harmonic Solution and Harmonic Impedance Scan.

Keywords: harmonic distortions, PCFLO, harmonic analysis, harmonic filters, harmonic impedance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Onda distorcida e suas componentes harmônicas.	17
Figura 2 – Onda ímpar.	20
Figura 3 – Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao eixo vertical.	20
Figura 4 – Onda assimétrica em relação aos eixos horizontal e vertical.	21
Figura 5 – Sequência de fases positiva.	22
Figura 6 – Sistema com 10% de tensão de 11ª harmônica.	26
Figura 7 – Curva de Magnetização $\varphi(t) \times i(t)$ de um Transformador.	29
Figura 8 – Forma de onda da Corrente de Magnetização de um Transformador.	30
Figura 9 – Espectro Harmônico da Corrente de Magnetização de um Transformador.	30
Figura 10 – Forma de Onda de Corrente de uma Lâmpada Fluorescente.	31
Figura 11 – Espectro harmônico da Corrente de uma Lâmpada Fluorescente.	31
Figura 12 – Forma de Onda da Corrente de um Forno a Arco.	32
Figura 13 – Espectro harmônico da Corrente de um Forno a Arco.	32
Figura 14 – Forma de Onda da Corrente de um Retificador de 12 pulsos.	32
Figura 15 – Forma de Corrente de um Regulador de Velocidade.	33
Figura 16 – Espectro Harmônico da Corrente de um Regulador de Velocidade.	33
Figura 17 – Forma de Onda da Corrente de uma Fonte Chaveada.	34
Figura 18 – Espectro Harmônico da Corrente de uma Fonte Chaveada.	34
Figura 19 – Sistema exemplo para verificação da norma ANSI/IEEE 18-2002.	36
Figura 20 – Aumento das Perdas por Histerese devido à Distorção de Tensão.	38
Figura 21 – Aumento das Perdas por Foucault devido à Distorção de Tensão.	38
Figura 22 – Perda de Vida Útil do Transformador devido à Elevação da Temperatura.	39
Figura 23 – Diminuição da Expectativa de Vida Útil do Transformador devido à Distorção de Corrente.	39
Figura 24 – Redução da Vida Útil do Motor devido à Distorção de Tensão.	40
Figura 25 – Redução da Vida Útil do Motor devido à Distorção de Corrente.	41
Figura 26 – Sistema exemplo de Ressonância Paralela.	50
Figura 27 – Sistema Exemplo de Ressonância Série.	51

Figura 28 – Sistema Exemplo de Ressonância.....	52
Figura 29 – Retificador de 6 pulsos.....	58
Figura 30 – Forma de Onda da Corrente de um Retificador de 6 pulsos.....	59
Figura 31 – Espectro Harmônico da Corrente de um Retificador de 6 pulsos.	59
Figura 32 – Retificador de 12 pulsos sem defasamento entre os transformadores.	59
Figura 33 – Retificador de 12 pulsos com defasamento de 30° entre os transformadores. ...	60
Figura 34 – Diagrama para visualização da eliminação da 5ª harmônica.....	61
Figura 35 – Diagrama para visualização da Eliminação da 7ª Harmônica.....	61
Figura 36 – Diagrama para visualização da Presença da 11ª Harmônica.	62
Figura 37 – Diagrama para visualização da Eliminação da 13ª Harmônica.....	63
Figura 38 – Diagrama para visualização da Eliminação da 17ª Harmônica.....	64
Figura 39 – Diagrama para visualização da Eliminação da 19ª Harmônica.....	64
Figura 40 – Sistema com Filtro Ativo de Harmônicos.....	66
Figura 41 – Tipos de Filtros Amortecidos.....	68
Figura 42 – Tipos de Filtros Sintonizados.	70
Figura 43 – Seletividade de um Filtro de Acordo com seu Fator de Qualidade (Q).	71
Figura 44 – Sistema Exemplo para Construção do Diagrama de Impedâncias.....	82
Figura 45 – Diagrama de Impedâncias do Sistema.....	83
Figura 46 – Sistema para Análise Harmônica.	86
Figura 47 – Visualização do arquivo LDAT_Header.csv quando aberto no Excel.	112
Figura 48 – Janela da Etapa 1 de 3 da Conversão do Texto em Colunas.....	112
Figura 49 – Janela da Etapa 2 de 3 da Conversão do Texto em Colunas.....	113
Figura 50 – Visualização do arquivo LDAT_Header.csv após Conversão do Texto para Colunas.	113
Figura 51 – Filtro harmônico no PCFLO.....	116
Figura 52 – Substituição de “vírgula” por “ponto” no Bloco de Notas.	118
Figura 53 – Substituição de “ponto-e-vírgula” por “vírgula” no Bloco de Notas.....	119
Figura 54 – Janela de Abertura da Interface do PCFLO	119
Figura 55 – Janela com as Opções de Solução do Programa.....	120
Figura 56 – Diretório do Programa com os Arquivos de Saída	121
Figura 57 –Janela com as Opções de Solução do Programa – “Harmonic Impedance Scan”.	122
Figura 58 – Janela da Etapa 3 de 3 da Conversão do Texto em Colunas.....	123
Figura 59 – Janela para Definição de Reconhecimento do Arquivo	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sequência de Fase das Ordens Harmônicas.	24
Tabela 2 – Regra para Identificação da Sequência de Fase das Harmônicas.....	24
Tabela 3 – Terminologia padronizada pelo PRODIST – Módulo 8, Revisão 7.....	42
Tabela 4 – Níveis de Referência para Distorções Individuais de Tensão (em porcentagem da tensão fundamental).	42
Tabela 5 – Valores de Referência da Distorção Total de Tensão (em porcentagem da tensão fundamental).....	43
Tabela 6 – Terminologia padronizada pelo PRODIST – Módulo 8, Revisão 8.....	43
Tabela 7 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	44
Tabela 8 – Limites Globais Inferiores para os Indicadores DTHI e DTHTS95%.	45
Tabela 9 – Limites Individuais para os Indicadores DTHI e DTHTS95%.	45
Tabela 10 – Dados das Tensões Nominais das Barras.....	87
Tabela 11 – Dados das Barras do Sistema.....	87
Tabela 12 – Dados dos Transformadores do Sistema.	87
Tabela 13 – Dados das Linhas do Sistema.	88
Tabela 14 – Dados das Harmônicas Geradas pelas Cargas Não-Lineares do Sistema.	88
Tabela 15 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.....	89
Tabela 16 – Limites do PRODIST – Revisão 7 – para os Níveis de Tensão das Barras do Sistema.....	89
Tabela 17 – Sistema com Filtros de 5º Harmônico na Barra 6 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.....	94
Tabela 18 – Sistema com Filtros de 5º Harmônico nas Barras 6 e 8 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.	96
Tabela 19 – Sistema com Filtros de 5º e 3º Harmônico nas Barras 6 e 8 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.	99
Tabela 20 – Cálculos de Suportabilidade dos Capacitores dos Filtros.....	99
Tabela 21 – Limites IEEE para Capacitores.....	100
Tabela 22 – Tipos de Cargas Não-Lineares Padronizadas no PCFLO.	115
Tabela 23 – Tipos de Conexão para Transformadores e Elementos Shunt.	117

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento da Reatância Indutiva com Relação à Frequência.....	47
Gráfico 2 - Comportamento da Reatância Capacitiva com Relação à Frequência.	48
Gráfico 3 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Circuito com Ressonância Paralela.....	49
Gráfico 4 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Circuito com Ressonância Série.....	51
Gráfico 5 – Impedância Harmônica vista da Barra 2, com Capacitor e sem Capacitor.....	54
Gráfico 6 – Gráfico 5 ampliado.	54
Gráfico 7 – Distorções Harmônicas na Barra 2 comparadas com limites do PRODIST.....	55
Gráfico 8 –Comparativo das Tensões na Barra 2 com limites do IEEE para capacitores.....	56
Gráfico 9 – Impedância harmônica vista da Barra 1, com e sem Capacitor	56
Gráfico 10 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Filtro Amortecido.	67
Gráfico 11 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Filtro Sintonizado.....	69
Gráfico 12 – Característica de Impedância com Relação à Frequência de um Filtro Sintonizado em duas Frequências.....	69
Gráfico 13 – Barra 6 – Valores de Distorção comparados com limites do PRODIST.	90
Gráfico 14 – Barra 12 – Valores de Distorção comparados com limites do PRODIST.	90
Gráfico 15 – Barra 13 – Valores de Distorção comparados com limites do PRODIST.	91
Gráfico 16 – Barra 6 – Comparação dos valores de Distorção do Sistema sem Filtros e com Filtros.....	101
Gráfico 17 – Barra 12 – Comparação dos valores de Distorção do Sistema sem Filtros e com Filtros.....	101
Gráfico 18 – Barra 13 – Comparação dos valores de Distorção do Sistema sem Filtros e com Filtros.....	102
Gráfico 19 – Comparação das Tensões Antes e Após a Inserção dos Filtros.....	102
Gráfico 20 – Impedância Harmônica da Barra 6 – antes e após a inserção dos filtros.....	103
Gráfico 21 – Impedância Harmônica da Barra 8 – antes e após a inserção dos filtros.....	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Estrutura deste Trabalho.....	15
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	17
2.1	Conceito.....	17
2.2	Série de Fourier.....	18
2.3	Ordem harmônica (h).....	19
2.4	Presença de Harmônicas conforme característica da forma de onda.....	19
2.4.1	Onda ímpar.....	19
2.4.2	Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao eixo vertical	20
2.4.3	Onda assimétrica em relação aos eixos horizontal e vertical.....	21
2.5	Sequência de Fase das Harmônicas.....	21
2.5.1	Segunda ordem harmônica.....	22
2.5.2	Terceira ordem harmônica	23
2.5.3	Quarta ordem harmônica	23
2.6	Valor Eficaz e de Pico para Sinais Distorcidos.....	24
2.7	Distorção Harmônica Total e Individual (DTT_h , DTI_h , DIT_h , DII_h).....	27
3	FONTES DE HARMÔNICOS E EFEITOS CAUSADOS NA REDE	29
3.1	Cargas Geradoras de Harmônicos.....	29
3.1.1	Transformadores.....	29
3.1.2	Sistemas de Iluminação	30
3.1.3	Fornos a Arco	31
3.1.4	Conversores Eletrônicos	32
3.1.4.1	Retificadores	32
3.1.4.2	Reguladores de Velocidade	33
3.1.4.3	Fontes chaveadas (comutadas)	33
3.2	Efeitos das distorções harmônicas	34

3.2.1	Perdas em Cabos	35
3.2.2	Perdas em Capacitores	36
3.2.3	Perdas em Transformadores	37
3.2.4	Perda em Máquinas Rotativas – Motores e Geradores	40
3.3	Regulamentação	41
3.3.1	Contexto Nacional	41
3.3.1.1	<i>PRODIST – Módulo 8</i>	<i>41</i>
3.3.1.2	<i>Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8</i>	<i>44</i>
3.3.2	Contexto Internacional	45
3.3.2.1	<i>IEC 61000-3-2 (2005)</i>	<i>45</i>
3.3.2.2	<i>IEEE 519 – 2014</i>	<i>46</i>
4	O FENÔMENO DA RESSONÂNCIA	47
4.1	Característica de Resposta dos Sistemas em Relação à Frequência	47
4.2	Ressonância Paralela	48
4.3	Ressonância Série	50
4.4	Exemplo Prático de Ressonância Paralela	52
5	MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	58
5.1	Aumento do Número de Pulsos	58
5.2	Filtros Ativos	65
5.3	Filtros Passivos	66
5.3.1	Filtros Amortecidos	67
5.3.1.1	<i>Característica da impedância em relação à frequência</i>	<i>67</i>
5.3.1.2	<i>Tipos de filtros amortecidos</i>	<i>68</i>
5.3.2	Filtros Sintonizados	68
5.3.2.1	<i>Característica da impedância em relação à frequência</i>	<i>68</i>
5.3.2.2	<i>Tipos de Filtros Sintonizados</i>	<i>70</i>
5.3.2.3	<i>Frequência de sintonia</i>	<i>70</i>
5.3.2.4	<i>Fator de Qualidade</i>	<i>71</i>
5.3.2.5	<i>Processo de dimensionamento de um filtro sintonizado simples</i>	<i>72</i>
5.3.3	Melhor local para inserção de um filtro passivo	80
6	ESTUDO DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA	81
6.1	Construção do Diagrama de Impedâncias	82
6.2	Construção da Matriz Admitância do Sistema	83
6.3	Cálculo das Tensões Harmônicas nas Barras	84
6.4	Cálculo das Correntes Harmônicas nos Ramos	85
6.5	Programa PCFLO	85
7	ESTUDO DE CASO	86

7.1	Apresentação do sistema a ser estudado	86
7.2	Análise dos Resultados	89
7.3	Solução Proposta	91
7.3.1	Projeto de Filtros Harmônicos Sintonizados	91
7.3.1.1	<i>Filtro para 5º harmônico</i>	91
7.3.1.2	<i>Filtro para 3º harmônico</i>	97
7.3.1.3	<i>Testes de Suportabilidade dos Filtros</i>	99
7.3.1.4	<i>Comparações do Sistema Antes e Após a Inserção dos Filtros</i>	101
8	CONCLUSÕES	104
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE A – INSTRUÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA PCFLO	109
A.1	Apresentação do Programa	109
A.2	Visão Geral do Funcionamento	109
A.2.1	Arquivos de Entrada	109
A.2.2	Procedimentos de Cálculo do Programa	110
A.2.3	Arquivos de Saída	110
A.3	Preenchimento dos Arquivos de Entrada	112
A.3.1	Preparação dos Arquivos para o Preenchimento	112
A.3.2	BDAT – Dados das Barras e Elementos Shunt	114
A.3.3	LDAT – Dados das Linhas e Elementos Série	116
A.3.4	SPECTRA – Dados das Fontes Harmônicas	117
A.3.5	Preparação dos arquivos preenchidos para inserção no PCFLO	118
A.4	Utilização da Interface do PCFLO	119
A.4.1	Estudo de Penetração Harmônica	121
A.5	Análise dos Resultados da Simulação	123
A.5.1	Preparação dos Arquivos de Saída para o Uso	123
A.5.2	VSOLN – Tensões Harmônicas nas Barras e Correntes Harmônicas Injetadas ...	124
A.5.4	ISOLN – Correntes Harmônicas nas Linhas	125
A.5.5	THDI – Distorção Total de Corrente nas Linhas	125
A.5.6	ZBUS1 – Impedância Harmônica das Barras	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Existem diversos problemas referentes à Qualidade da Energia Elétrica que influenciam características importantes do sinal de tensão, como forma de onda e frequência. Dentre esses, se encontram as distorções harmônicas, que são muito frequentes nos sistemas elétricos e o principal objeto de estudo deste trabalho.

As distorções harmônicas surgem no sistema devido à presença de cargas com características não lineares que, geralmente, têm seu funcionamento à base de eletrônica de potência. Essas cargas estão presentes em boa parte dos aparelhos eletrônicos utilizados atualmente, como fontes de equipamentos eletrônicos e lâmpadas fluorescentes.

Ao serem conectadas ao sistema, tais cargas geram correntes distorcidas, que circulam pela rede, resultando em distorções na tensão em outras barras além das que foram inseridas. Essas correntes e tensões harmônicas causam uma série de consequências negativas aos equipamentos da rede, que geralmente são sensíveis a variações na forma de onda e na frequência da tensão.

Portanto, é importante estudar as distorções harmônicas e seu comportamento para analisar as consequências causadas por elas ao longo do sistema e prover soluções para o problema. Isto pode ser feito por meio do estudo de penetração harmônica, que é a forma de analisar um sistema com geração harmônica, de modo a obter os efeitos causados em todos os ramos e barras do sistema.

1.2 Objetivos

Com este trabalho, objetiva-se realizar o estudo de penetração harmônica de um sistema, utilizando um *software* de simulação do fluxo harmônico. Por meio deste estudo, deseja-se conhecer as consequências da geração de correntes harmônicas em outras barras - que não aquela de origem da corrente distorcida.

Para alcançar o objetivo citado, alguns objetivos específicos devem ser atingidos. São eles:

- Realizar uma revisão bibliográfica geral sobre diversos tópicos do assunto distorções harmônicas;

- Conhecer e utilizar o *software* PCFLO;
- Fazer estudo de caso de um sistema com cargas geradoras de harmônicos;
- Analisar o estudo e implementar soluções para eventuais problemas observados;

1.3 Estrutura deste Trabalho

A estrutura desta monografia foi dividida em oito capítulos, com os respectivos títulos:

1. Introdução;
 2. Fundamentos de Distorções Harmônicas;
 3. Fontes de Harmônicos e Efeitos Causados na Rede;
 4. O Fenômeno da Ressonância;
 5. Métodos de Mitigação das Distorções Harmônicas;
 6. Estudo de Penetração Harmônica;
 7. Estudo de Caso;
 8. Conclusões;
- Apêndice A – Instruções para Utilização do Programa PCFLO;

A Introdução do Capítulo 1 tem por objetivo delimitar e apresentar os objetos de estudo deste trabalho, bem como justificar e dar relevância para as questões pesquisadas. Além disso, ela ambienta o leitor à estrutura que será observada nos capítulos seguintes.

O Capítulo 2, Fundamentos de Distorções Harmônicas, visa apresentar e caracterizar as distorções harmônicas. Além disso, esse capítulo mostra a ferramenta matemática utilizada para o estudo de uma onda distorcida. Por fim, são apresentadas as equações para determinação dos índices de distorções harmônicas.

Uma vez apresentados os conhecimentos básicos no Capítulo 2, o Capítulo 3, Fontes de Harmônicos e Efeitos Causados na Rede, discorre sobre diversas cargas geradoras de harmônicos e as consequências destes nos equipamentos e elementos da rede. Ainda, cita as principais normas e recomendações nacionais e internacionais referentes a distorções harmônicas.

O Capítulo 4, por sua vez, trata sobre o assunto Ressonâncias Série e Paralela. São analisados sistemas com ocorrência de ambos os tipos de ressonância e seus comportamentos quando há injeção de corrente harmônica de mesma ordem da frequência de ressonância. Neste capítulo, é apresentado um exemplo prático de ressonância paralela, no qual é feita a simulação de análise da impedância harmônica de suas barras, demonstrando a ocorrência de ressonância paralela.

No Capítulo 5, são apresentadas as diversas formas de mitigação de harmônicos: aumento do número de pulsos, filtros ativos e filtros passivos. É dado maior enfoque aos filtros harmônicos passivos sintonizados e um passo a passo do dimensionamento deste tipo de solução é apresentado.

O Capítulo 6 discorre sobre o estudo de penetração harmônica e como devem ser feitos seus cálculos. Ainda, é apresentado o programa PCFLO, que utiliza o mesmo método de cálculo descrito anteriormente.

O Capítulo 7 apresenta o estudo de caso de um sistema com geração harmônica em alguns pontos. É feita a análise harmônica deste sistema utilizando o programa PCFLO e apresentada a solução proposta para este sistema, que consiste na inserção de filtros harmônicos passivos sintonizados. Os resultados da simulação do sistema com os filtros são novamente analisados neste capítulo.

O Capítulo 8 realiza o fechamento do trabalho, por meio da conclusão de tudo o que foi apresentado em cada capítulo. Por fim, o Apêndice A traz um manual do PCFLO, que apresenta instruções para sua utilização desde a preparação dos arquivos de entrada até a análise dos arquivos de resultados.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

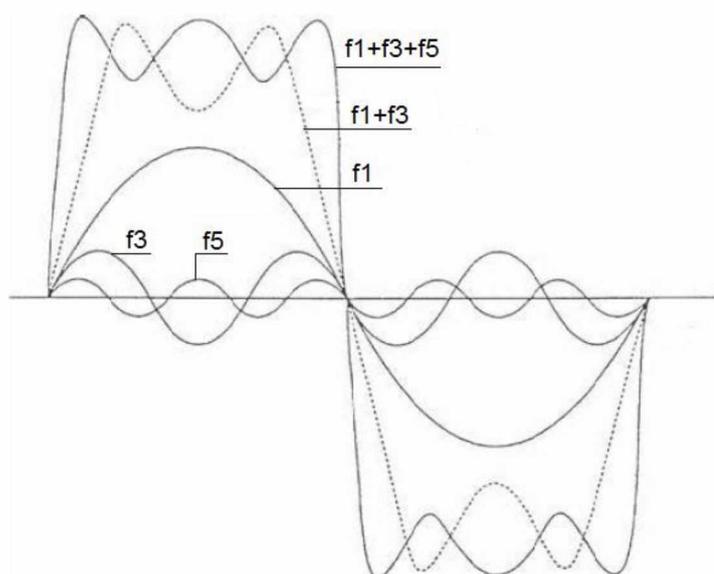
Este capítulo destina-se ao estudo das principais definições a respeito das distorções harmônicas, desde seu conceito, característica das formas de onda até apresentação de equações importantes para esse assunto.

2.1 Conceito

Componentes harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental (60 Hz). Esses sinais, quando inseridos no sistema elétrico, dão origem a uma forma de onda resultante distorcida, ou seja, uma onda periódica não senoidal.

Tal sinal distorcido pode ser decomposto, utilizando uma ferramenta matemática chamada Série de Fourier, em uma soma das suas componentes fundamental e harmônicas. Dessa maneira, um sinal não-senoidal passa, agora, a ser estudado como uma soma de sinais senoidais de diferentes frequências e amplitudes, como representado na Figura 1.

Figura 1 – Onda distorcida e suas componentes harmônicas.



Fonte: *Power Systems Harmonics and Passive Filter Design* [1].

O estudo do sinal elétrico é facilitado pelo uso da Série de Fourier, pois são estudadas apenas ondas senoidais. Porém, cada frequência deve ser analisada separadamente, o que torna o estudo um pouco trabalhoso, pois um sinal distorcido pode ter inúmeras componentes harmônicas.

2.2 Série de Fourier

Como dito anteriormente, a ferramenta utilizada para estudar um sinal distorcido por harmônicas é a Série de Fourier. Por meio desta ferramenta, qualquer forma de onda periódica não-senoidal pode ser decomposta em termos de corrente contínua, frequência fundamental e harmônicas. A Série de Fourier pode ser usada em forma de senos, cossenos e uma combinação de ambos, como na Equação (1).

$$f(t) = A_0 + [A_1 \text{sen}(\omega t) + A_2 \text{sen}(2\omega t) + \dots + A_h \text{sen}(h\omega t)] + \dots \\ \dots + [B_1 \text{cos}(\omega t) + B_2 \text{cos}(2\omega t) + \dots + B_h \text{cos}(h\omega t)] \quad (1)$$

Em que:

A_0 é o valor médio, ou valor em corrente contínua, dado por: $A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$,

sendo T o período da onda, dado por: $T = \frac{1}{f}$ e f , a frequência, em Hz;

A_h é a magnitude de cada harmônica dos termos em seno, que são dados, genericamente, por: $A_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(h\omega t) dt$;

B_h é a magnitude de cada harmônica dos termos em cosseno, que são dados, genericamente, por: $B_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{cos}(h\omega t) dt$;

ω é a frequência fundamental, em radianos por segundo;

h é o múltiplo da frequência fundamental, ou ordem harmônica;

Usando apenas os termos em seno, obtém-se a Equação (2).

$$v(t) = V_0 + V_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (2)$$

Em que:

V_0 é o valor médio, ou valor em corrente contínua;

V_1 é a magnitude da componente fundamental;

V_h é a magnitude da componente harmônica de ordem h ;

φ_1 é o ângulo de fase à frequência fundamental;

φ_h é o ângulo de fase da harmônica h ;

De forma expandida, tem-se a Equação (3).

$$v(t) = V_0 + V_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_2 \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + V_3 \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + \dots \quad (3)$$

2.3 Ordem harmônica (h)

Nos estudos de distorções harmônicas, é usual utilizar o termo ordem harmônica, representado pela letra h , para especificar a frequência harmônica. A ordem harmônica é o fator multiplicador inteiro da fundamental correspondente à dada harmônica. Por exemplo, a harmônica de ordem 3 ou $h = 3$ corresponde à frequência que é 3 vezes a frequência fundamental. No caso do Brasil, que possui frequência fundamental igual a 60 Hz, a frequência da harmônica de ordem 3 é 180 Hz.

Tal prática é adotada para uma maior padronização do estudo, visto que, de acordo com o país e a aplicação analisada, a frequência fundamental varia. Por exemplo, no Brasil e Estados Unidos, a frequência fundamental é 60 Hz, mas no Reino Unido e outros países europeus, se utiliza 50 Hz. Também se usa essa prática devido à facilidade de identificação da harmônica que está sendo estudada, bem como praticidade nos cálculos, visto que tudo é feito baseado na frequência fundamental e as harmônicas são tratadas apenas como múltiplos [2].

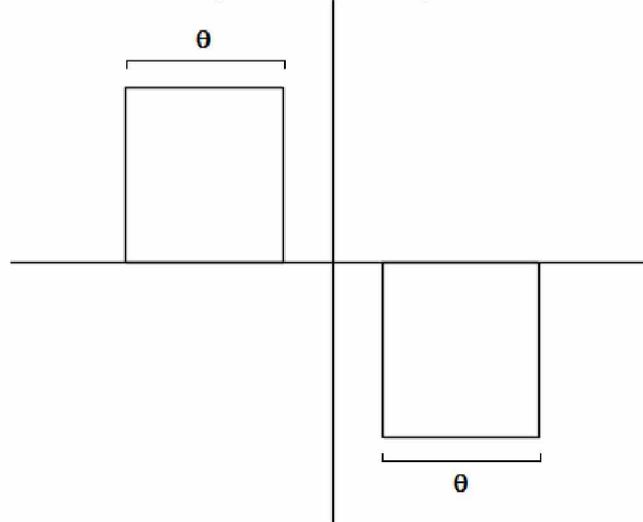
2.4 Presença de Harmônicas conforme característica da forma de onda

Dado um sinal distorcido, conforme as características de sua forma de onda, é possível identificar as ordens harmônicas presentes na mesma.

2.4.1 Onda ímpar

Seja uma onda ímpar, ou seja, simétrica em relação à origem, como na Figura 2.

Figura 2 – Onda ímpar.



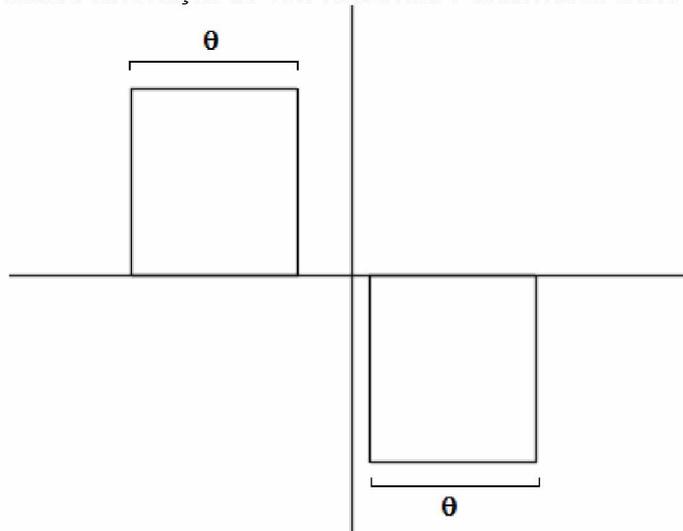
Fonte: Elaborada pelo autor.

- Se $\theta \neq 120^\circ$, então este sinal não possui ordens harmônicas pares, ou seja, as ordens presentes são $h = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, \dots$
- Se $\theta = 120^\circ$, então este sinal não possui harmônicas pares, nem de ordem 3 e seus múltiplos, então, as ordens presentes são $h = 1, 5, 7, 11, 13, 17, \dots$

2.4.2 Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao eixo vertical

Seja uma onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao eixo vertical, como na Figura 3.

Figura 3 – Onda simétrica em relação ao eixo horizontal e assimétrica em relação ao eixo vertical.



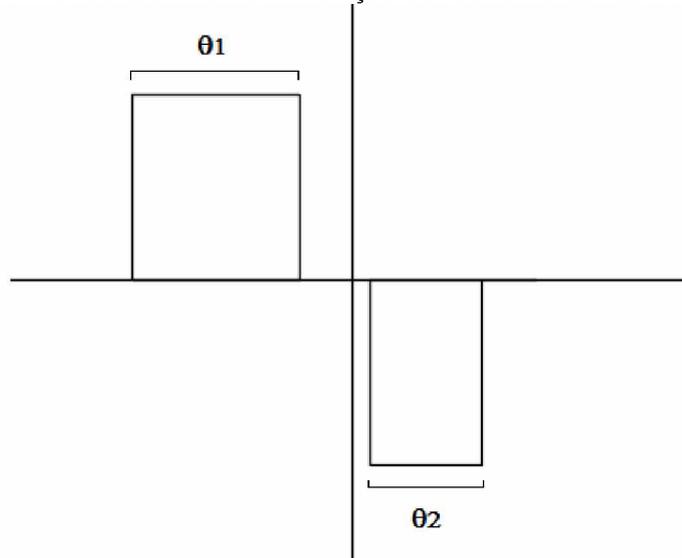
Fonte: Elaborada pelo autor.

- Se $\theta \neq 120^\circ$, então, este sinal possui todas as ordens harmônicas, ou seja as ordens presentes são $h = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \dots$
- Se $\theta = 120^\circ$, então, este sinal não possui harmônicas de ordem 3 e seus múltiplos, ou seja, as ordens presentes são $h = 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, \dots$

2.4.3 Onda assimétrica em relação aos eixos horizontal e vertical

Seja um sinal com forma de onda assimétrica em relação a ambos os eixos, como na Figura 4.

Figura 4 – Onda assimétrica em relação aos eixos horizontal e vertical.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- $\theta_1 \neq \theta_2$, então, este sinal possui todas as ordens harmônicas e também componente contínua, ou seja, as ordens presentes são $h = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$

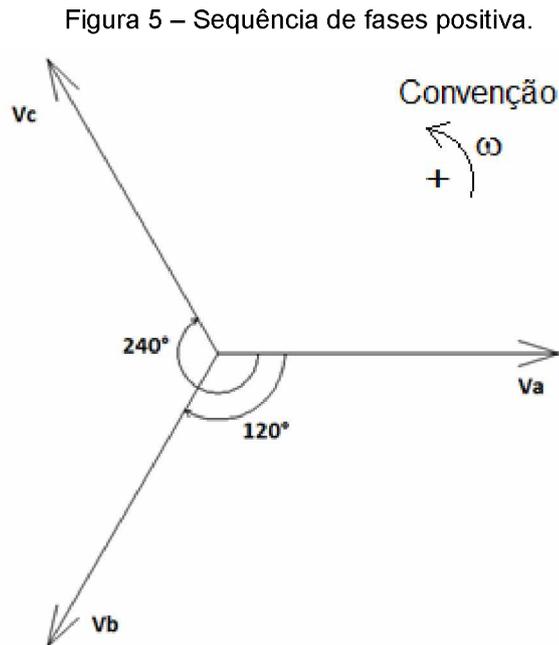
2.5 Sequência de Fase das Harmônicas

Sistemas trifásicos desequilibrados são estudados por um método chamado Componentes Simétricas, em que um sistema desequilibrado é decomposto em três sistemas equilibrados, de sequências de fase diferentes. Estas componentes são:

- Positiva: representa o elemento de tensão ou corrente em condições equilibradas, com sequência de fases abc denominada positiva;
- Negativa: representa o elemento com sequência de fases cba, ou seja, inverso à sequência positiva;

- Zero: representa o elemento não girante;

Como exemplo, será utilizado um sistema de tensões de sequência de fases positiva, mostrado na Figura 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As tensões de cada fase de um sistema de sequência positiva são dadas pelas Equações (4a), (4b) e (4c).

$$v_{a1} = V_{a1} \text{sen}(\omega t) \quad (4a)$$

$$v_{b1} = V_{b1} \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (4b)$$

$$v_{c1} = V_{c1} \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \quad (4c)$$

Para análise harmônica, as tensões e correntes fundamentais são tomadas como referência e são de sequência positiva. A partir destas, deseja-se descobrir a sequência de fases que cada ordem harmônica possui. O desenvolvimento a seguir é válido apenas para sistemas equilibrados.

2.5.1 Segunda ordem harmônica

As tensões de cada fase de segunda harmônica são dadas pelas Equações (5a), (5b) e (5c).

$$v_{a2} = V_{a2} \text{sen}(2\omega t) \quad (5a)$$

$$v_{b2} = V_{b2} \text{sen}(2\omega t - 2 \times 120^\circ) = V_{b2} \text{sen}(2\omega t - 240^\circ) \quad (5b)$$

$$v_{c2} = V_{c2} \text{sen}(2\omega t - 2 \times 240^\circ) = V_{c2} \text{sen}(2\omega t - 480^\circ) = V_{c2} \text{sen}(2\omega t - 120^\circ) \quad (5c)$$

Assim, pode-se perceber que a segunda harmônica possui sequência contrária à da frequência fundamental, ou seja, possui sequência negativa.

2.5.2 Terceira ordem harmônica

As tensões de cada fase de segunda harmônica são dadas pelas Equações (6a), (6b) e (6c).

$$v_{a3} = V_{a3} \text{sen}(3\omega t) \quad (6a)$$

$$v_{b3} = V_{b3} \text{sen}(3\omega t - 3 \times 120^\circ) = V_{b3} \text{sen}(3\omega t - 360^\circ) = V_{b3} \text{sen}(3\omega t) \quad (6b)$$

$$v_{c3} = V_{c3} \text{sen}(3\omega t - 3 \times 240^\circ) = V_{c3} \text{sen}(3\omega t - 720^\circ) = V_{c3} \text{sen}(3\omega t) \quad (6c)$$

Pode-se perceber que as três fases da terceira harmônica estão em fase, ou seja, a terceira harmônica possui sequência zero.

2.5.3 Quarta ordem harmônica

As tensões de cada fase de segunda harmônica são dadas pelas Equações (7a), (7b) e (7c).

$$v_{a4} = V_{a4} \text{sen}(4\omega t) \quad (7a)$$

$$v_{b4} = V_{b4} \text{sen}(4\omega t - 4 \times 120^\circ) = V_{b4} \text{sen}(4\omega t - 480^\circ) = V_{b4} \text{sen}(4\omega t - 120^\circ) \quad (7b)$$

$$v_{c4} = V_{c4} \text{sen}(4\omega t - 4 \times 240^\circ) = V_{c4} \text{sen}(4\omega t - 960^\circ) = V_{c4} \text{sen}(4\omega t - 240^\circ) \quad (7c)$$

Assim, pode-se perceber que a quarta harmônica se comporta como a frequência fundamental e, portanto, possui sequência positiva.

Continuando os cálculos para todas as ordens, conclui-se que existe um padrão para a sequência de fase das harmônicas, como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Sequência de Fase das Ordens Harmônicas.

Ordem (h)	Sequência
1	Positiva
2	Negativa
3	Zero
4	Positiva
5	Negativa
6	Zero
7	Positiva
...	...

Portanto, verifica-se que existe uma regra para identificação da sequência de fase das ordens harmônicas, e esta se encontra na Tabela 2.

Tabela 2 – Regra para Identificação da Sequência de Fase das Harmônicas.

Sequência	Harmônicas Presentes
Zero	$h = 3k$
Positiva	$h = 3k + 1$
Negativa	$h = 3k - 1$

A sequência de fase das harmônicas indica a rotação de suas fases em relação à frequência fundamental. Seu conhecimento é importante, pois é um dos fatores que agravam efeitos indesejados no sistema causados pelas distorções harmônicas, como será analisado posteriormente.

2.6 Valor Eficaz e de Pico para Sinais Distorcidos

O valor eficaz de um sinal é o valor equivalente contínuo que corresponde ao efeito térmico em corrente alternada. Em corrente alternada, o valor eficaz é calculado ao se igualar as energias dissipadas por uma resistência ao circular por ela uma corrente alternada e uma corrente contínua, como demonstrado nas Equações (8a) a (8e), considerando-se um sinal senoidal.

$$E_{dca} = E_{dcc} \quad (8a)$$

$$\int_0^T R i^2(t) dt = R I^2 T \quad (8b)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (8c)$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t) \quad (8d)$$

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (8e)$$

Em que E_{dca} é a energia dissipada em corrente alternada, E_{dcc} é a energia dissipada em corrente contínua, I_m é a corrente máxima, ou de pico.

De semelhante modo, a tensão eficaz é dada por $V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$, em que V_m é a tensão máxima, ou de pico. Para um sinal distorcido, o desenvolvimento é feito como anteriormente e mostrado nas Equações (9a) a (9f).

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (9a)$$

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hm} \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (9b)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(I_0 + I_{1m} \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hm} \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \right)^2 dt} \quad (9c)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + \left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_{hm}}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (9d)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_{hm}^2}{2}} \quad (9e)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_{hef}^2} \quad (9f)$$

Em que I_0 é a componente de corrente contínua, I_{1m} é a corrente máxima, ou de pico, fundamental, I_{hm} é a corrente máxima de ordem h e I_{hef} é a corrente eficaz da ordem h .

De modo semelhante, a tensão eficaz de um sinal distorcido é dada pela Equação (10).

$$V_{ef} = \sqrt{V_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_{hef}^2} \quad (10)$$

Em que:

V_{1m} é a tensão máxima, ou de pico, fundamental;

V_{hm} é a tensão máxima de ordem h ;

V_{1ef} é a tensão eficaz fundamental;

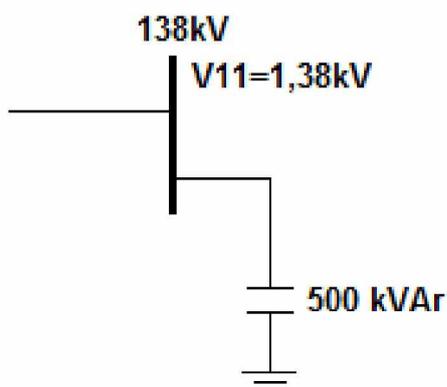
V_{hef} é a tensão eficaz da ordem h .

Desta forma, o valor eficaz de um sinal distorcido é uma composição do efeito térmico e não uma soma algébrica.

Já o valor de pico de um sinal distorcido, na pior situação que pode ocorrer, isto é, quando o pico de todas as ordens ocorrem em um mesmo instante, pode ser calculado como a soma algébrica dos valores de pico de cada harmônica com a fundamental.

Para uma melhor ilustração, seja o sistema da Figura 6, com 10% de tensão de 11ª harmônica.

Figura 6 – Sistema com 10% de tensão de 11ª harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A corrente fundamental no capacitor e sua reatância são calculadas como nas Equações (11) e (12).

$$I_{n1} = \frac{Q}{\sqrt{3}V} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 13,8} = 20,9 \text{ A} \quad (11)$$

$$X_{c1} = \frac{V^2}{Q} = \frac{13,8^2}{0,5} = 380 \Omega \quad (12)$$

Os cálculos para 11ª harmônica são conforme Equações (13), (14) e (15).

$$V_{11} = \frac{1,38}{\sqrt{3}} = 797 \text{ V} \quad (13)$$

$$X_{c11} = \frac{X_{c1}}{11} = \frac{380}{11} = 34,5 \Omega \quad (14)$$

$$I_{11} = \frac{V}{\sqrt{3} \times X_{c11}} = \frac{1380}{\sqrt{3} \times 34,5} = 23,09 \text{ A} \quad (15)$$

Ao se comparar a corrente de 11ª harmônica com a fundamental, a corrente não parece ter aumentado muito, como pode ser visto no resultado da Equação (16), porém, a melhor quantificação da corrente é dada pelo valor eficaz, calculado e comparado com a corrente fundamental nas Equações (17) e (18).

$$\frac{I_{11}}{I_1} = \frac{23,09}{20,9} = 1,105 = 110,5\% \quad (16)$$

$$I_{ef} = \sqrt{20,9^2 + 23,09^2} = 31,15 \text{ A} \quad (17)$$

$$\frac{I_{ef}}{I_1} = \frac{31,15}{20,9} = 1,49 = 149\% \quad (18)$$

2.7 Distorção Harmônica Total e Individual (DTT_h , DTI_h , DIT_h , DII_h)

A medida mais usada para mensurar as distorções harmônicas, tanto de corrente quanto de tensão, é a Distorção Harmônica Total. Como sugere o nome, esta medida quantifica o total das distorções harmônicas do sinal. Ela é dada, em porcentagem, pela relação entre o valor eficaz das harmônicas do sinal distorcido (tensão ou corrente) e o valor eficaz da fundamental. A Distorção Harmônica Total de Tensão e de Corrente são calculadas pelas Equações (19) e (20).

$$DTT_h = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} 100\% \quad (19)$$

$$DTI_h = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} 100\% \quad (20)$$

Em que:

DTT_h é a Distorção Harmônica Total de Tensão;

V_h é o valor eficaz da tensão harmônica de ordem h ;

V_1 é o valor eficaz da tensão fundamental;

DTI_h é a Distorção Harmônica Total de Corrente;

I_h é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem h ;

I_1 é o valor eficaz da corrente fundamental;

Outra medida muito utilizada para quantificar harmônicos, quer seja de corrente, quer de tensão, é a Distorção Harmônica Individual. Como o nome indica, esta medida quantifica a distorção de apenas uma ordem harmônica. Ela é dada pela relação entre o valor eficaz da harmônica analisada e o valor eficaz da fundamental do sinal analisado. A Distorção Harmônica Individual de Tensão e de Corrente são calculadas como nas Equações (21) e (22).

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} 100\% \quad (21)$$

$$DII_h = \frac{I_h}{I_1} 100\% \quad (22)$$

Em que DIT_h é a Distorção Harmônica Individual de Tensão e DII_h é a Distorção Harmônica Individual de Corrente.

3 FONTES DE HARMÔNICOS E EFEITOS CAUSADOS NA REDE

As centrais elétricas geram tensões senoidais praticamente puras, assim, conclui-se que os harmônicos não surgem de geradores, mas sim de alguns tipos de cargas. Estas cargas produzem correntes harmônicas, que, ao circularem pelo sistema no sentido carga-gerador, resultam também em tensões harmônicas nas barras ao longo do sistema.

Este capítulo destina-se ao estudo das principais cargas geradoras de harmônicos bem como dos efeitos causados por eles. Também são citadas as principais regulamentações referentes aos limites recomendados para as distorções harmônicas, tanto no cenário nacional quanto internacional.

3.1 Cargas Geradoras de Harmônicos

Existem diversas fontes de correntes harmônicas. As principais são as chamadas cargas não-lineares, que são cargas acionadas por um dispositivo de chaveamento, como por exemplo transistores. Ao serem submetidas a uma tensão senoidal, tais cargas produzem uma corrente distorcida.

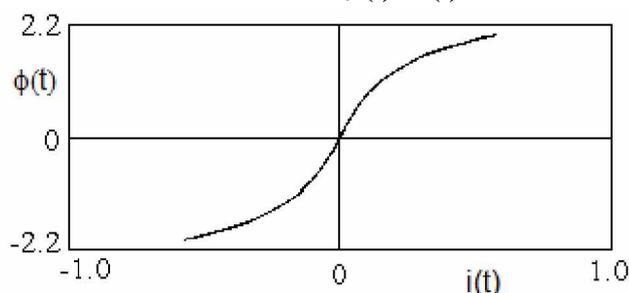
Abaixo são listadas as principais cargas geradoras de harmônicos:

- Transformadores;
- Sistemas de iluminação;
- Fornos a arco;
- Conversores eletrônicos de potência;

3.1.1 Transformadores

Os transformadores são máquinas saturáveis, e sua curva de magnetização possui característica não-linear, conforme Figura 7.

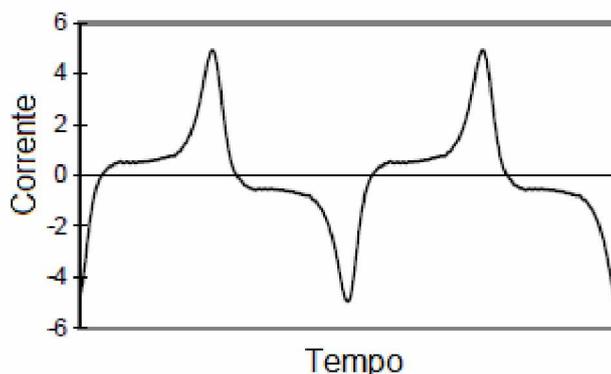
Figura 7 – Curva de Magnetização $\phi(t) \times i(t)$ de um Transformador.



Fonte: Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica [3].

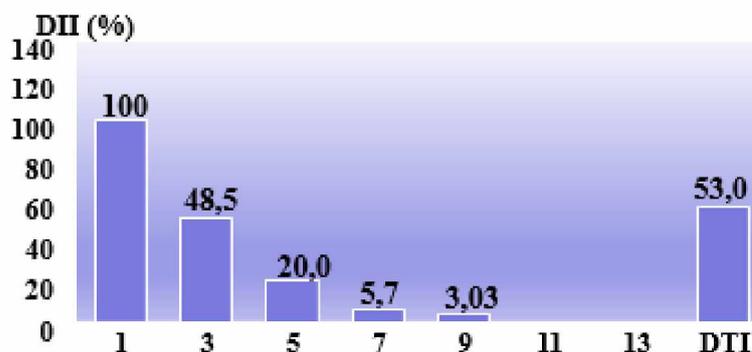
Naturalmente, o fluxo de um transformador fica próximo do “joelho” de sua curva, o que faz com que sua corrente de magnetização seja bastante distorcida, como pode ser visto na Figura 8 e na Figura 9.

Figura 8 – Forma de onda da Corrente de Magnetização de um Transformador.



Fonte: *Understanding Power System Harmonics* [4].

Figura 9 – Espectro Harmônico da Corrente de Magnetização de um Transformador.

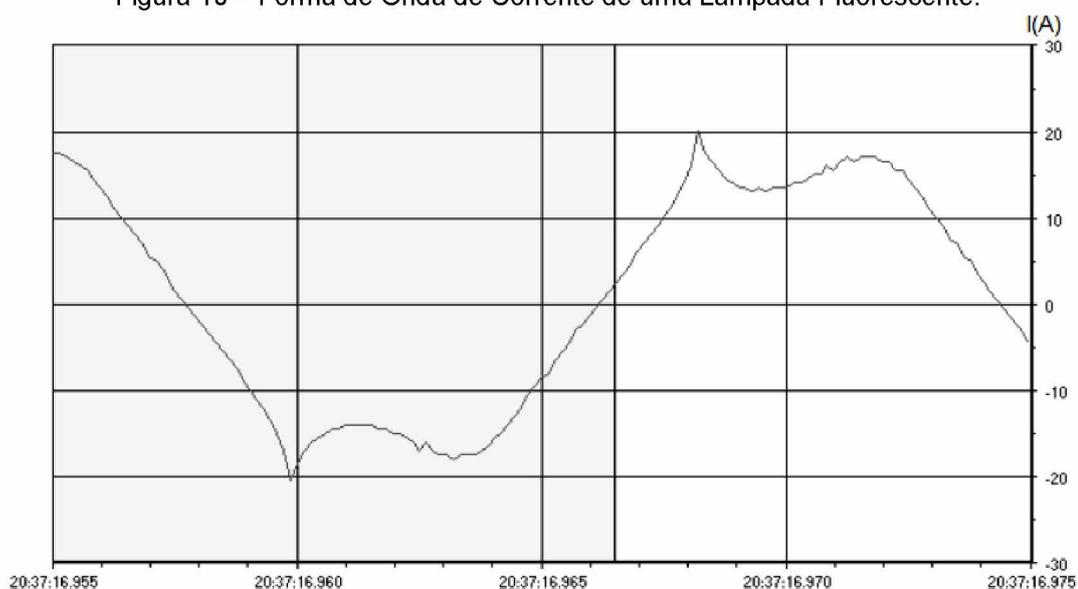


Quando um transformador está operando com corrente muito baixa, ou a vazio, o que predomina é esta corrente de magnetização, que possui bastante conteúdo harmônico, o que é indicado pela sua forma de onda bastante distorcida. Durante a madrugada, que é um momento de baixa carga e altas tensões, o fluxo magnético é elevado, acentuando a saturação do transformador e intensificando a presença de harmônicos na rede, principalmente de 3ª ordem.

3.1.2 Sistemas de Iluminação

As lâmpadas fluorescentes compactas são cargas não-lineares e são ligadas à rede por meio de um reator eletrônico integrado, que tem por função dar partida estabilizada à lâmpada, limitando sua corrente. Como pode ser visto na Figura 10 e na Figura 11, a corrente deste tipo de carga é bastante distorcida e tem elevado conteúdo harmônico de ordens ímpares, principalmente de 3º e 5º harmônico.

Figura 10 – Forma de Onda de Corrente de uma Lâmpada Fluorescente.



Fonte: *Power Quality* [2].

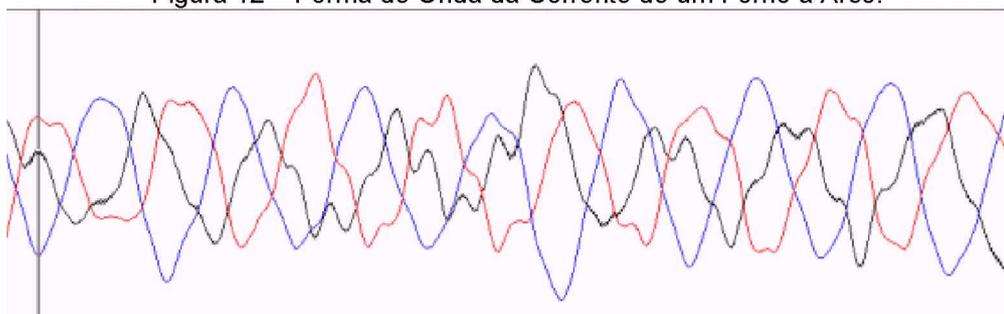
Figura 11 – Espectro harmônico da Corrente de uma Lâmpada Fluorescente.



3.1.3 Fornos a Arco

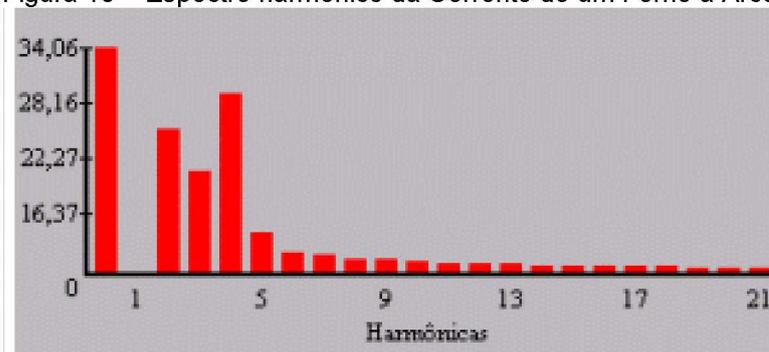
Os fornos a arco são utilizados na indústria siderúrgica, para produção de ligas metálicas a partir da fusão de sucatas. O arco elétrico é utilizado para derreter a sucata para ser reaproveitada na siderurgia. A característica tensão-corrente do arco elétrico não é linear e esta não linearidade depende do comprimento do arco e também de características do meio condutor do plasma, como material, temperatura e pressão [3]. Essa característica faz com que esse tipo de aplicação gere muita corrente harmônica, como se vê na Figura 12 e na Figura 13.

Figura 12 – Forma de Onda da Corrente de um Forno a Arco.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos [5].

Figura 13 – Espectro harmônico da Corrente de um Forno a Arco.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos [5].

As máquinas de solda e lâmpadas de descarga têm funcionamento similar.

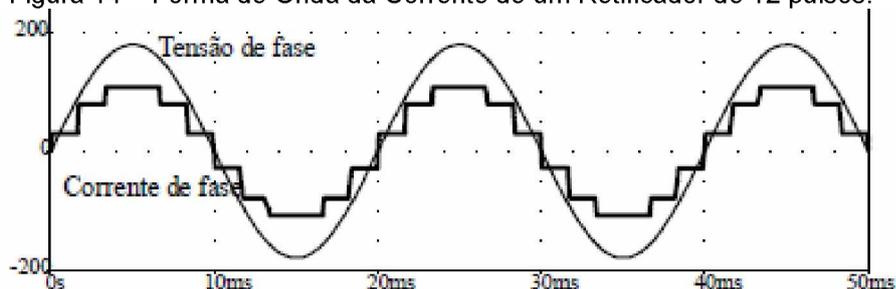
3.1.4 Conversores Eletrônicos

Dentro deste grupo se encontram as principais cargas não-lineares, como retificadores e inversores.

3.1.4.1 Retificadores

Eles transformam corrente alternada em corrente contínua. Existem vários tipos de retificadores e são utilizados em várias aplicações, como transmissão em corrente contínua, geração fotovoltaica e eólica. A Figura 14 mostra a forma de onda da corrente de um retificador de 12 pulsos.

Figura 14 – Forma de Onda da Corrente de um Retificador de 12 pulsos.



Fonte: Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica [3].

3.1.4.2 Reguladores de Velocidade

São utilizados para controle de velocidade de motores, melhorando sua partida. Sua forma de onda de corrente e espectro harmônico são vistos na Figura 15 e na Figura 16.

Figura 15 – Forma de Corrente de um Regulador de Velocidade.

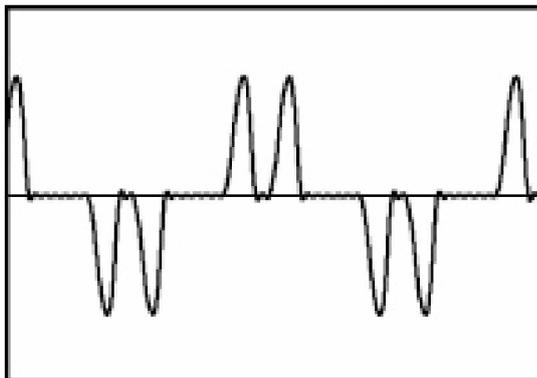
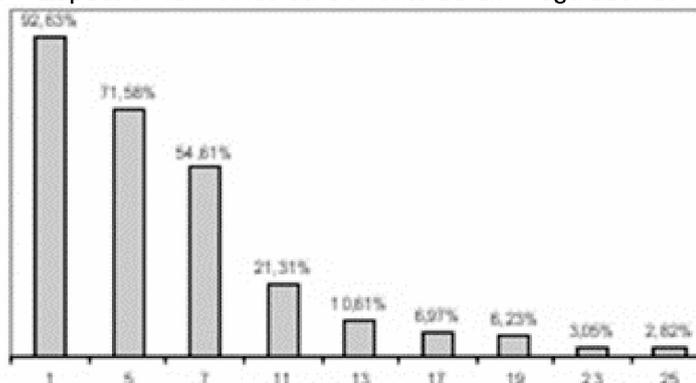


Figura 16 – Espectro Harmônico da Corrente de um Regulador de Velocidade.



3.1.4.3 Fontes chaveadas (comutadas)

São usadas para controlar a tensão em uma carga, abrindo e fechando rapidamente o circuito, reduzindo e retificando a tensão. São utilizadas em computadores, carregadores de celular, aparelhos de som e de televisão.

Sua forma de onda e espectro harmônico podem ser vistos na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 – Forma de Onda da Corrente de uma Fonte Chaveada.

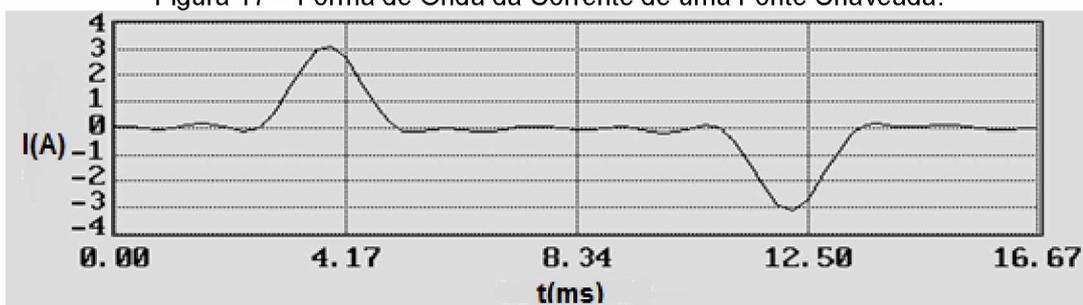
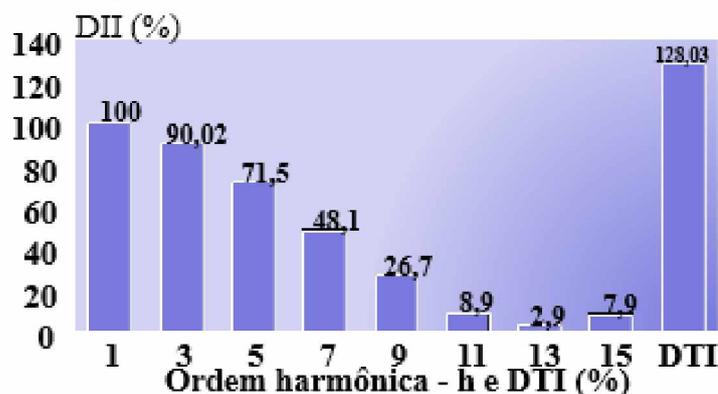


Figura 18 – Espectro Harmônico da Corrente de uma Fonte Chaveada.



Este grupo configura a maior fonte de harmônicos em cargas residenciais/comerciais. Sua corrente de 3º harmônico pode chegar a 90% da corrente fundamental, como pode ser visto na Figura 18.

3.2 Efeitos das distorções harmônicas

Uma vez inseridas na rede por cargas não-lineares, as componentes harmônicas geram uma série de consequências indesejáveis ao longo do sistema. Dentre elas, pode-se dizer que as mais importantes e a causa da maioria dos problemas são sobrecorrente e sobretensões nos equipamentos.

Isto se deve ao fato de o sistema e os equipamentos em geral serem projetados para suportarem a corrente e tensão fundamentais. Porém, quando há presença de harmônicos na rede, como visto na seção 2.6, a corrente resultante, bem como a tensão, se torna uma composição da fundamental e das harmônicas, sendo, portanto, um valor superior ao esperado pela rede e seus equipamentos, desencadeando diversos problemas, dos quais podem ser citados:

- Perdas em cabos, capacitores, transformadores e máquinas rotativas;
- Perda de vida útil em equipamentos;

3.2.1 Perdas em Cabos

A corrente elétrica em um condutor cilíndrico sólido circula por ele de forma uniforme em toda sua seção reta circular, desde que em corrente contínua. Em corrente alternada, isto não se verifica, pois, com o aumento da frequência da corrente, esta tende a circular pela periferia do condutor, o que é chamado de efeito pelicular, ou efeito “skin” [6].

Ao circular pela periferia do condutor e não de maneira distribuída por toda sua seção reta, a área de circulação da corrente diminui, o que acarreta em um aumento da resistência aparente. Isso ocorre pois a resistência de um condutor é inversamente proporcional à sua área, como pode ser analisado na expressão da resistência elétrica de um condutor, dada pela Equação (23).

$$R = \frac{\rho \ell}{S} \quad (23)$$

Em que:

R é a resistência elétrica do condutor;

ρ é a resistividade;

ℓ é o comprimento do condutor;

S é a seção reta transversal do condutor;

Portanto, verifica-se que, na presença de harmônicos, há um aumento na resistência elétrica aparente do condutor. Logo, torna-se nítido o aumento nas perdas resistivas do cabo, pois, além da elevação da resistência com a frequência, a presença de correntes harmônicas eleva o valor eficaz da corrente. Ao observar a Equação (24), percebe-se que a perda resistiva do cabo é proporcional à sua resistência, bem como ao quadrado da corrente eficaz que circula por ele.

$$P_{jh} = R_h \times I_{ef}^2 \quad (24)$$

Em que:

P_{jh} é a perda resistiva, ou joulica, do cabo;

R_h é a resistência do cabo;

I_{ef} é a corrente eficaz;

3.2.2 Perdas em Capacitores

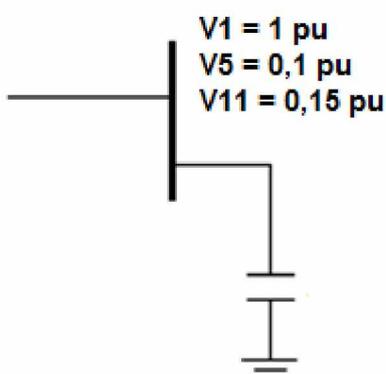
Os bancos de capacitores são muito comuns no sistema elétrico principalmente devido à correção de fator de potência. Eles são dimensionados para operar de acordo com a norma ANSI/IEEE 18-2002 [7], que especifica os seguintes limites de tensão, corrente e potência para os capacitores:

- Tensão Eficaz: Devem suportar até 110% do valor nominal;
- Corrente Eficaz: Devem suportar até 180% do valor nominal de fase;
- Potência: Devem suportar até 135% do valor nominal;
- Tensão de Pico: Devem suportar até 120% do valor nominal;

Quando há correntes e tensões harmônicas no sistema, estes limites são comumente ultrapassados, o que pode causar falhas na operação dos bancos. Além disso, devido à reatância capacitiva ser inversamente proporcional à frequência, nas frequências harmônicas, a reatância capacitiva é menor. Isso faz com que os capacitores absorvam correntes harmônicas, causando sobrecarga e sobreaquecimento no banco. Este efeito será melhor detalhado no Capítulo 4, que tratará sobre Ressonâncias.

Para uma melhor visualização da aplicação da norma, seja o exemplo da Figura 19, o qual possui uma barra com tensões harmônicas de ordem 5 e 11 e, em paralelo, existe um banco de capacitor. O exemplo será feito em pu para maior facilidade nos cálculos. Deseja-se verificar se os limites da norma ANSI/IEEE 18-2002 estão sendo respeitados para este capacitor.

Figura 19 – Sistema exemplo para verificação da norma ANSI/IEEE 18-2002.



Seja X_{c1} e I_1 iguais a 1 pu. O cálculo da reatância e corrente para cada ordem pode ser visto nas Equações (25) a (28).

$$X_{c5} = \frac{X_{c1}}{5} = 0,2 \text{ pu} \quad (25)$$

$$I_5 = \frac{V_5}{X_{c5}} = \frac{0,1}{0,2} = 0,5 \text{ pu} \quad (26)$$

$$X_{c11} = \frac{X_{c1}}{11} = 0,091 \text{ pu} \quad (27)$$

$$I_{11} = \frac{V_{11}}{X_{c11}} = \frac{0,15}{0,091} = 1,65 \text{ pu} \quad (28)$$

Agora, pode-se verificar os limites da norma, calculando os valores eficazes de corrente e tensão pelas Equações (29) a (31):

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_{11}^2} = \sqrt{1^2 + 0,5^2 + 1,65^2} = 1,99 \text{ pu} = 199\% \quad (29)$$

$$V_{ef} = \sqrt{V_1^2 + V_5^2 + V_{11}^2} = \sqrt{1^2 + 0,1^2 + 0,15^2} = 1,016 \text{ pu} = 101,6\% \quad (30)$$

$$V_{pico} = V_1 + V_5 + V_{11} = 1 + 0,1 + 0,15 = 1,25 \text{ pu} = 125\% \quad (31)$$

Portanto, a corrente eficaz (199%) e a tensão de pico (125%) violaram os limites da Norma, que são, respectivamente 180% e 120%. A tensão eficaz (101,6%) respeitou o limite da norma, que é 110%.

3.2.3 Perdas em Transformadores

Naturalmente, os transformadores possuem perdas no núcleo, perdas nos enrolamentos e perdas adicionais, conforme Equação (32).

$$Perdas_{Transformadores} = Perdas_{Núcleo} + Perdas_{Enrolamentos} + Perdas_{Adicionais} \quad (32)$$

Em um sistema com correntes e tensões harmônicas, estas perdas são agravadas, gerando sobreaquecimento e reduzindo a vida útil dos transformadores. As perdas no núcleo, ou perdas no ferro, são devidas a Histerese e Foucault, conforme Equação (33).

$$Perdas_{Núcleo} = Perdas_{Histerese} + Perdas_{Foucault} \quad (33)$$

A presença de tensões harmônicas aumenta as perdas no núcleo, como pode ser visto na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 20 – Aumento das Perdas por Histerese devido à Distorção de Tensão.

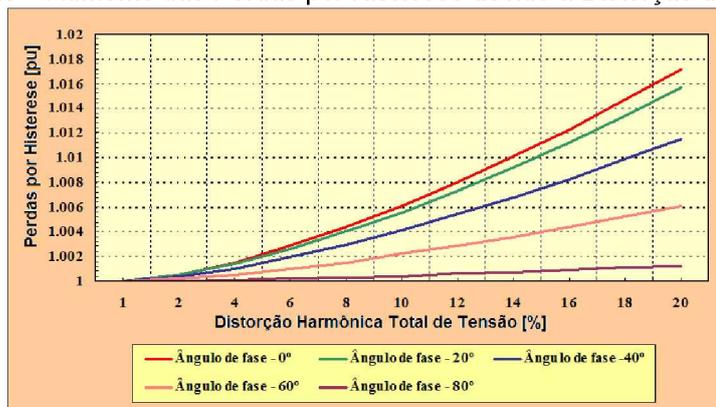


Figura 21 – Aumento das Perdas por Foucault devido à Distorção de Tensão.



Existem, ainda, as perdas adicionais, que são em torno de 15% das perdas no núcleo, ou seja, também são agravadas com as tensões harmônicas. Já as perdas nos enrolamentos, ou joulicas, são agravadas pela presença de correntes harmônicas, pois são proporcionais ao quadrado da corrente, como pode ser visto na Equação (34).

$$Perdas_{Enrolamentos} = R_p \times I_p^2 + R_s \times I_s^2 \quad (34)$$

Em que:

R_p é a resistência do enrolamento primário;

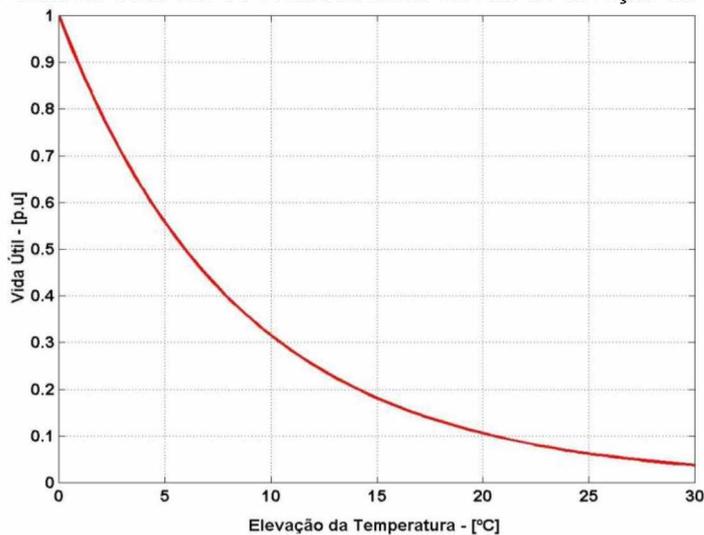
R_s é a resistência do enrolamento secundário;

I_p é a corrente no primário;

I_s é a corrente no secundário;

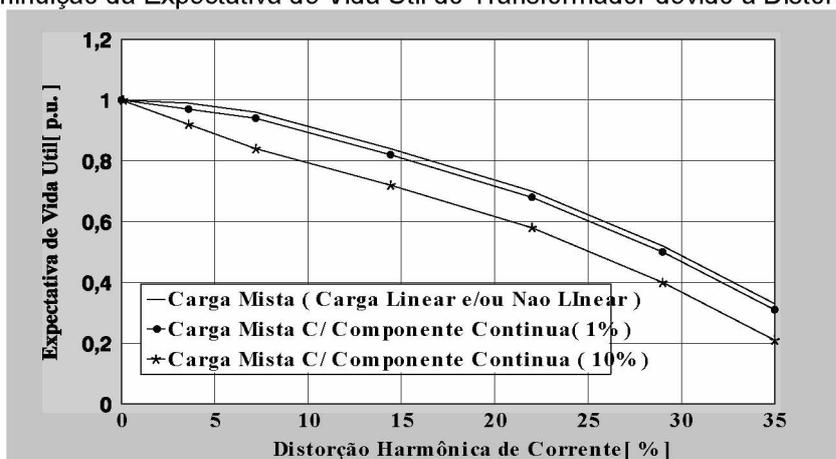
Como pode ser observado na Equação (34), quanto maior a corrente eficaz, maiores as perdas no enrolamento. Assim, quanto maior o conteúdo harmônico da corrente, maiores serão estas perdas. Devido às correntes harmônicas, também ocorre sobreaquecimento do transformador, acarretando em perda de vida útil, como pode ser visto na Figura 22 e na Figura 23.

Figura 22 – Perda de Vida Útil do Transformador devido à Elevação da Temperatura.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos [5].

Figura 23 – Diminuição da Expectativa de Vida Útil do Transformador devido à Distorção de Corrente.



Fonte: Harmônicos em Sistemas Elétricos [5].

3.2.4 Perda em Máquinas Rotativas – Motores e Geradores

Nos motores de indução, assim como nos transformadores, as distorções harmônicas agravam as perdas no cobre, gerando aquecimento excessivo e reduzindo sua vida útil. As distorções harmônicas, em altas frequências, diferentes da fundamental, podem também ocasionar oscilação no torque da máquina, gerando vibrações e ruídos.

Em geradores síncronos, as tensões harmônicas no estator induzem correntes harmônicas no rotor. Estas correntes, causam oscilações no torque. Por exemplo, correntes de 5^a (sequência negativa) e 7^a harmônica (sequência positiva) criam um campo magnético no rotor que gira em uma velocidade de seis vezes a velocidade fundamental. Este campo induz correntes nas barras do rotor de seis vezes a frequência fundamental. Assim, a interação entre os campos magnéticos e as correntes induzidas no rotor, produz fortes oscilações no eixo do motor. Se a frequência da oscilação coincidir com a frequência natural do rotor, podem resultar danos graves ao motor, como desgastes, vibrações e ruídos [2].

A redução da vida útil de um motor de indução em função da distorção de tensão e corrente pode ser vista na Figura 24 e na Figura 25.

Figura 24 – Redução da Vida Útil do Motor devido à Distorção de Tensão.

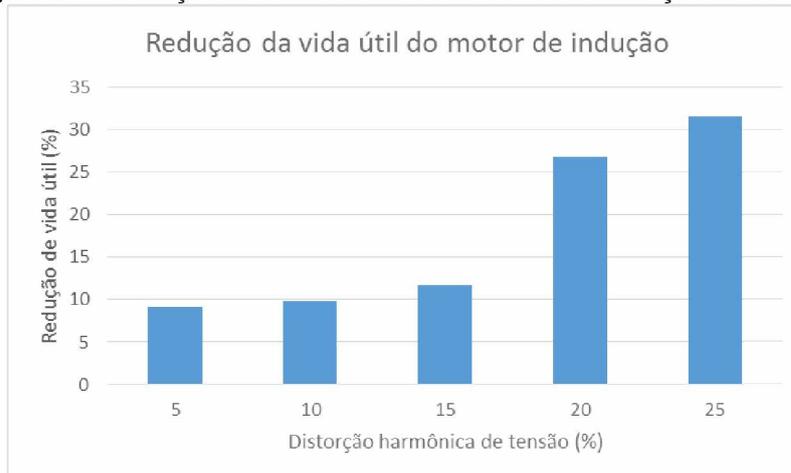
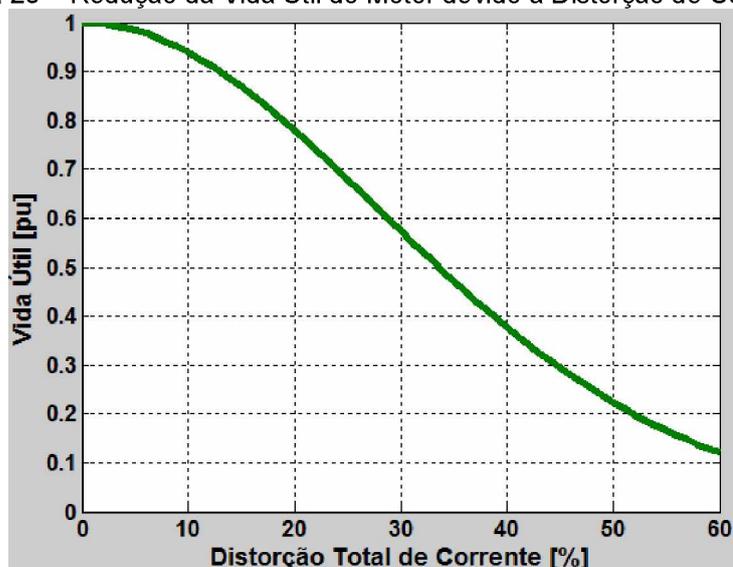


Figura 25 – Redução da Vida Útil do Motor devido à Distorção de Corrente.



3.3 Regulamentação

Para limitar os níveis de harmônicos na rede, evitando os efeitos descritos anteriormente, existem diversas normas e recomendações tanto no contexto nacional quanto internacional, citadas a seguir.

3.3.1 Contexto Nacional

3.3.1.1 *PRODIST – Módulo 8*

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no documento PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, em seu módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica [8], propõe valores para a Distorção Harmônica Total e Individual de Tensão e padroniza a terminologia referente ao assunto.

A seguir são apresentadas as tabelas das últimas duas revisões da norma, sendo que a revisão vigente é a Revisão 8. A terminologia padronizada na Revisão 7 se encontra na Tabela 3.

Tabela 3 – Terminologia padronizada pelo PRODIST – Módulo 8, Revisão 7.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	H _{máx}
Ordem harmônica mínima	H _{min}
Tensão fundamental medida	V_1

Fonte: PRODIST – Módulo 8, Revisão 7 [8].

As grandezas definidas como DIT_h e DTT são calculadas, respectivamente, como nas Equações (21) e (19) da seção 2.7. Os valores limites individuais e totais de distorção harmônica de tensão da Revisão 7 estão na Tabela 4 e na Tabela 5, respectivamente. Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Tabela 4 – Níveis de Referência para Distorções Individuais de Tensão (em porcentagem da tensão fundamental).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: PRODIST – Módulo 8, Revisão 7 [8].

Tabela 5 – Valores de Referência da Distorção Total de Tensão (em porcentagem da tensão fundamental).

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Fonte: PRODIST – Módulo 8, Revisão 7 [8].

Ainda, segundo o documento, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações. Além disso, estabelece que o espectro harmônico a ser considerado para fins de cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h = 25$).

Na Revisão 8, porém, houve algumas mudanças e a terminologia padronizada se encontra na Tabela 6.

Tabela 6 – Terminologia padronizada pelo PRODIST – Módulo 8, Revisão 8.

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

Fonte: PRODIST – Módulo 8, Revisão 8 [8].

As grandezas definidas como DIT_h e DTT são calculadas, respectivamente, como nas Equações (21) e (19) da seção 2.7. DTT_p , DTT_i e DTT_3 também são calculadas da mesma forma, com o cuidado de se observar quais componentes estão sendo consideradas no cálculo.

Os limites para as distorções totais de tensão padronizados na Revisão 8 se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_{i95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST – Módulo 8, Revisão 8 [8].

Nesta revisão, não existem limites para as distorções individuais de tensão.

3.3.1.2 Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8

Ainda no contexto nacional, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por meio do documento Procedimentos de Rede, em seu submódulo 2.8 – Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica [9], faz também recomendações quanto aos níveis aceitáveis de harmônicos na rede. Segundo o documento, para a avaliação da distorção harmônica de tensão são utilizados os indicadores $DTHI$ (Distorção de Tensão Harmônica Individual, calculado como DIT , na Equação (21) da seção 2.7, mudando apenas a sigla utilizada) e $DTHTS95\%$.

O indicador $DTHTS95\%$ é obtido determinando-se o valor que foi superado em 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos. O valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos, em base diária, ao longo de 7 dias consecutivos.

O desempenho da Rede Básica quanto à distorção harmônica de tensão é avaliado a partir da comparação dos indicadores $DTHI$ e $DTHTS95\%$ com os respectivos limites global e individual.

Os limites globais inferiores para os indicadores $DTHI$ e $DTHTS95\%$ estão apresentados na Tabela 8 e os limites globais superiores são determinados pela

multiplicação dos limites globais inferiores correspondentes pelo fator 4/3. Por exemplo, os limites globais superiores de $DTHTS95\%$ para $V < 69$ kV e $V \geq 69$ kV são, respectivamente, 8% e 4%.

Tabela 8 – Limites Globais Inferiores para os Indicadores DTHI e DTHTS95%.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Fonte: Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8 [9].

Os limites individuais para $DTHI$ e $DTHT95\%$ estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites Individuais para os Indicadores DTHI e DTHTS95%.

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

Fonte: Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8 [9].

Ainda, segundo o documento, para o cálculo de cada indicador deve-se utilizar o maior valor dentre os valores de cada fase, em cada intervalo de integralização.

3.3.2 Contexto Internacional

É importante ressaltar que no cenário internacional, diferentemente das normas brasileiras, as principais recomendações acerca de harmônicos são referentes à distorção harmônica de corrente, e são estabelecidas pelo IEC e pelo IEEE.

3.3.2.1 IEC 61000-3-2 (2005)

Esta norma, criada pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*) – entidade internacional, mas com abrangência essencialmente europeia, que gera recomendações técnicas na área de eletricidade – estabelece limites para as distorções harmônicas da corrente de entrada que podem ser produzidas por diversos equipamentos elétricos e eletrônicos. Ela é aplicável no sistema de

distribuição, em baixa tensão, a aparelhos com corrente de entrada de até 16 A por fase.

3.3.2.2 IEEE 519 – 2014

Este documento é uma recomendação produzida pelo IEEE que possui abordagem diferente da IEC 61000-3-2, pois os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum – PAC – (entre as fontes e cargas), e não em cada equipamento individual. Este enfoque sugere que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação [10].

4 O FENÔMENO DA RESSONÂNCIA

Este capítulo se destina ao estudo das ressonâncias série e paralela que podem ocorrer em sistemas elétricos, bem como suas consequências geradas na rede.

4.1 Característica de Resposta dos Sistemas em Relação à Frequência

Para entender o fenômeno da ressonância, primeiramente é preciso analisar o comportamento dos principais componentes de um sistema em relação à frequência. Estes elementos são o indutor e o capacitor.

Sabe-se que a reatância indutiva é dada pela Equação (35).

$$X_L = 2\pi f L \quad (35)$$

Em que:

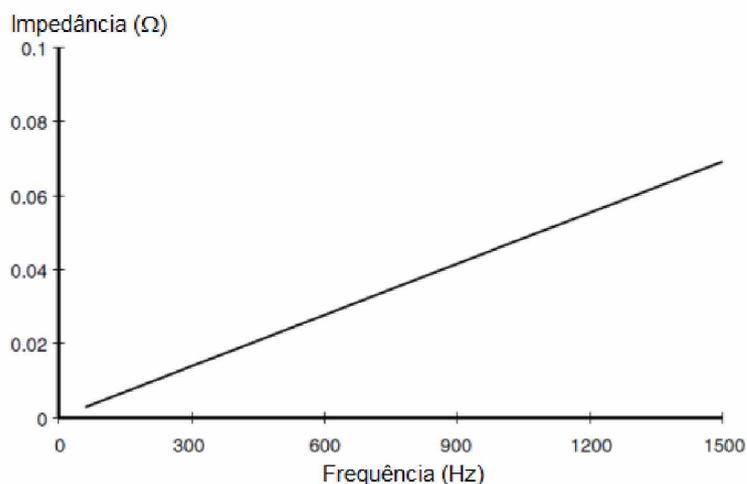
X_L é a reatância indutiva (Ω);

f é a frequência (Hz);

L é a indutância (H);

Analisando a Equação (35), percebe-se que a reatância indutiva aumenta com a frequência, o que pode ser visto também no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Comportamento da Reatância Indutiva com Relação à Frequência.



Já a reatância capacitiva é dada pela Equação (36).

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (36)$$

Em que:

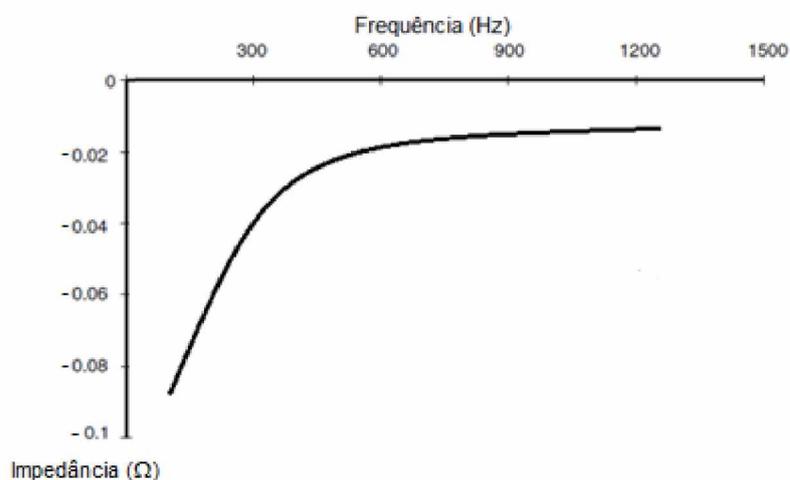
X_C é a reatância capacitiva (Ω);

f é a frequência (Hz);

C é a capacitância (F);

Observando a Equação (36), percebe-se que a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência, o que pode ser visto também no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comportamento da Reatância Capacitiva com Relação à Frequência.



Observa-se que ambas as reatâncias capacitiva e indutiva variam seu valor de acordo com a frequência. Portanto, dependendo da configuração do circuito e de como os elementos capacitivos e indutivos estão combinados (em série ou em paralelo), o sistema como um todo se comporta de forma diferente em relação à frequência.

4.2 Ressonância Paralela

Seja um circuito composto por um indutor e um capacitor em paralelo. A impedância equivalente deste circuito pode ser calculada pela Equação (37a), que desenvolvida, se torna a Equação (37b).

$$Z_h = \frac{(jhX_{L1})\left(-j\frac{X_{C1}}{h}\right)}{jhX_{L1} + \left(-j\frac{X_{C1}}{h}\right)} \quad (37a)$$

$$Z_h = \frac{X_{L1}X_{C1}}{j\left(hX_{L1} - \frac{X_{C1}}{h}\right)} \quad (37b)$$

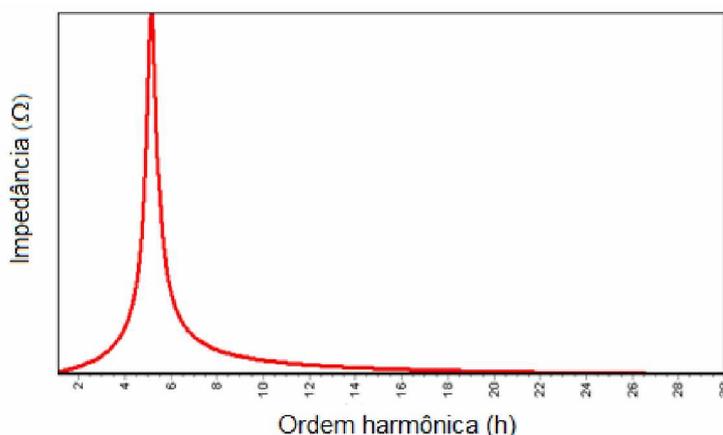
Percebe-se que a impedância equivalente desse circuito varia com a frequência. Assim, quando $hX_{L1} = \frac{X_{C1}}{h}$, o denominador desta expressão é nulo e a impedância equivalente tende a infinito.

Portanto, para qualquer circuito LC paralelo, existe uma frequência na qual a impedância equivalente se torna muito alta, tendendo a infinito. Esta frequência é chamada de frequência de ressonância e é dada pela Equação (38).

$$h_0 = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (38)$$

Nesta frequência de ressonância, pequenos valores de corrente podem causar grandes tensões, pois a impedância é muito alta. Assim, a queda de tensão será proporcional à impedância equivalente do circuito. O Gráfico 3 mostra a característica da impedância em relação à frequência de um circuito com ressonância paralela. Neste caso, a ressonância ocorre para frequência de ordem 5, ou seja 300 Hz.

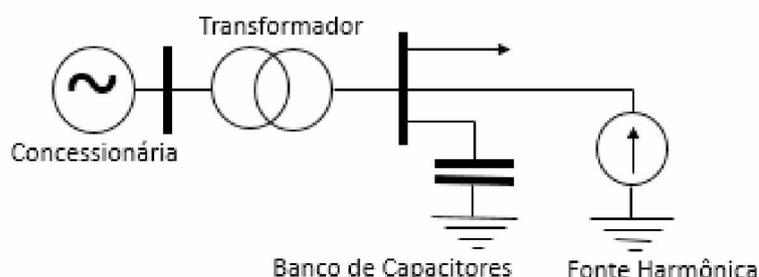
Gráfico 3 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Circuito com Ressonância Paralela.



A ocorrência de ressonância paralela é muito comum, pois, frequentemente, existem bancos de capacitores para correção do fator de potência em sistemas industriais e controle de nível de tensão nos sistemas de distribuição. Estes bancos de capacitores são conectados em paralelo ao sistema, que, por sua vez, possuem característica predominantemente indutiva devido aos transformadores e alimentadores. Este arranjo configura um circuito ressonante paralelo, com sua frequência de ressonância própria.

Caso haja uma corrente harmônica de mesma ordem circulando por este sistema, como na Figura 26, por menor que seja esta componente, o resultado poderá ser uma tensão harmônica muito alta. Esta tensão elevada, por sua vez, produzirá uma alta corrente harmônica circulando por este circuito, muitas vezes de valor superior ao gerado pela fonte harmônica, e trará uma série de consequências indesejadas, até mesmo a queima do banco de capacitores, que é muito sensível a sobretensões.

Figura 26 – Sistema exemplo de Ressonância Paralela.



4.3 Ressonância Série

Seja um circuito RLC série. A impedância equivalente deste circuito, em função da frequência, é dada pela Equação (39).

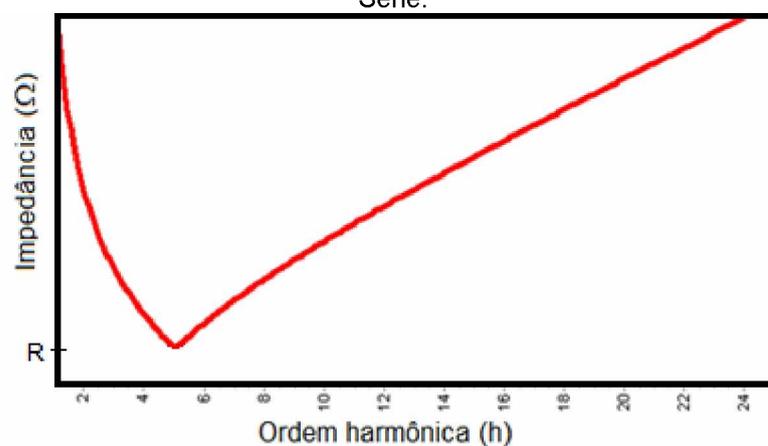
$$Z_h = R + jhX_{L1} - j\frac{X_{C1}}{h} \quad (39)$$

Ao observar a Equação (39), percebe-se que, quando $hX_{L1} = \frac{X_{C1}}{h}$, a impedância equivalente do circuito é mínima e predominantemente resistiva. Portanto, para qualquer circuito RLC série, existe uma frequência na qual a

impedância equivalente do circuito se torna muito baixa. Esta frequência é chamada de frequência de ressonância e é dada pela Equação (38).

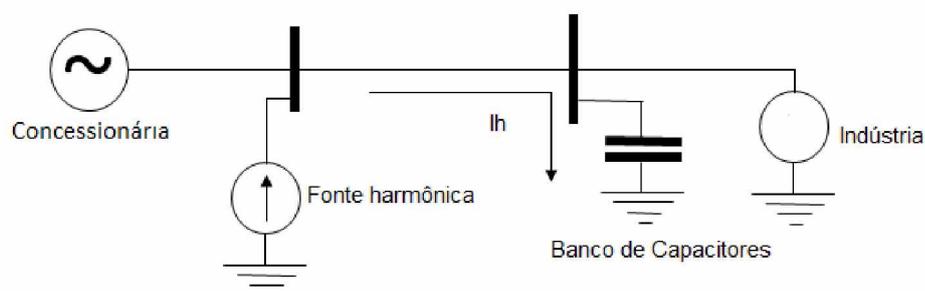
Nesta frequência de ressonância, pequenas tensões podem causar altas correntes, pois a impedância é muito baixa. O Gráfico 4 mostra a característica da impedância em relação à frequência de um circuito com ressonância série. Neste circuito, a ressonância ocorre para frequência de ordem 5, ou seja 300 Hz.

Gráfico 4 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Circuito com Ressonância Série.



A ressonância série também é bastante comum nos sistemas, como será explicado a seguir. Seja o sistema da Figura 27, em que a indústria possui um banco de capacitores em paralelo para correção do fator de potência.

Figura 27 – Sistema Exemplo de Ressonância Série



Em altas frequências, a reatância capacitiva do banco de capacitores decresce mais fortemente com a frequência do que a reatância indutiva cresce com ela, o que torna a impedância equivalente da indústria predominantemente capacitiva. Assim, a indústria forma, com a linha, que é predominantemente indutiva,

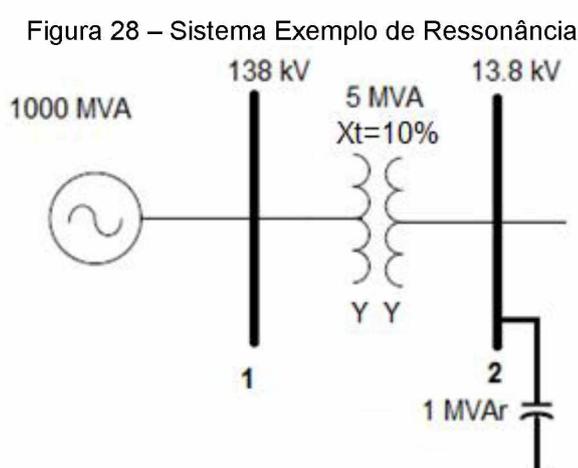
um circuito série ressonante, com sua frequência de ressonância própria, atraindo para si correntes harmônicas de mesma ordem.

Dessa forma, caso haja, como na Figura 27, uma carga geradora de corrente harmônica, que produza corrente harmônica da mesma ordem da frequência de ressonância, esta avistará o circuito ressonante série e será atraída por ele, ao invés de seguir seu curso natural em direção à fonte do sistema. Ou seja, mesmo que a indústria não tenha cargas geradoras de harmônicos, ela poderá atrair para seu banco de capacitores harmônicos de cargas vizinhas do sistema, gerando sobrecarga e aquecimento nos mesmos [13].

O circuito série ressonante é muito utilizado para a construção de filtros harmônicos, com frequência de ressonância igual à da componente harmônica que se deseja retirar do sistema. Como o filtro apresentará impedância baixa para esta frequência, esta corrente será atraída para ele e desviada do sistema para o aterramento. Seu funcionamento será melhor explicado no Capítulo 5.

4.4 Exemplo Prático de Ressonância Paralela

Seja o sistema da Figura 28. Na barra 1 existe uma fonte de tensão representando o equivalente de curto circuito de um sistema de 138 kV. Conectado à barra 1 existe um transformador de 5 MVA, que alimenta um capacitor em 13,8 kV, de 1Mvar. O capacitor está em paralelo com a barra 2.



O sistema será inserido no programa PCFLO para simulação da impedância harmônica das barras. Para isso, é preciso calcular os dados em pu, como abaixo. A

potência base utilizada é a mesma do programa, 100 MVA e os cálculos serão feitos referidos para 13,8 kV.

A Equação (40) mostra o cálculo da impedância base do sistema.

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{13,8^2}{100} = 1,9044 \Omega \quad (40)$$

As Equações (41) a (46) mostram o cálculo das reatâncias ao longo do sistema, em Ω e em pu.

- Reatância indutiva da barra 1

$$X_{s1} = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{1000} = 0,19044 \Omega \quad (41)$$

$$X_{s1(pu)} = \frac{0,19044}{1,9044} = 0,1 \text{ pu} \quad (42)$$

- Reatância indutiva do transformador

$$X_T = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{5} \cdot \frac{10}{100} = 3,8088 \Omega \quad (43)$$

$$X_{T(pu)} = \frac{3,8088}{1,9044} = 2 \text{ pu} \quad (44)$$

- Reatância capacitiva do Capacitor – barra 2

$$X_{c1} = \frac{V^2}{Q_c} = \frac{13,8^2}{1} = 190,44 \Omega \quad (45)$$

$$X_{c1(pu)} = \frac{190,44}{1,9044} = 100 \text{ pu} \quad (46)$$

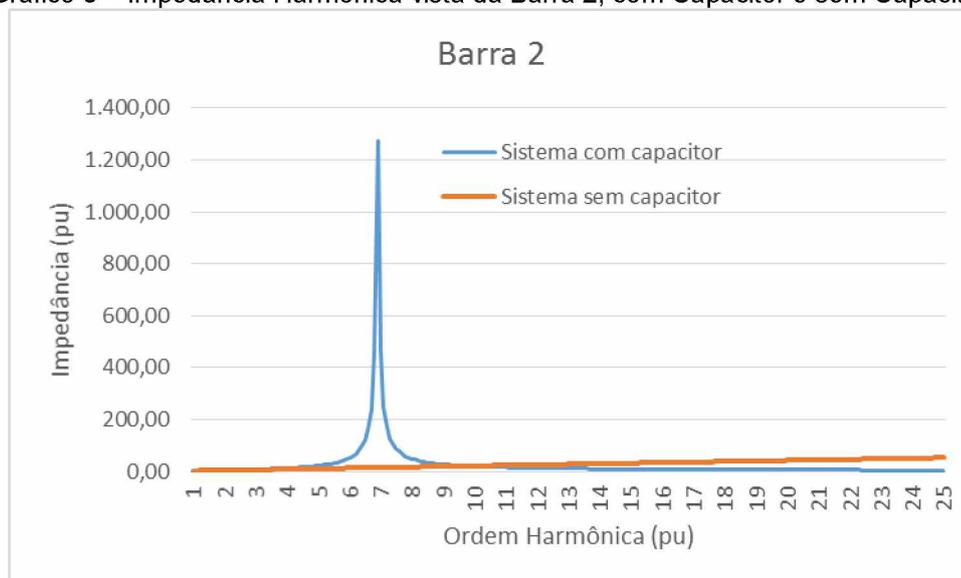
Do ponto de vista da barra 2, o capacitor está em paralelo com o circuito série rede e transformador, que é indutivo. Assim, pode ocorrer uma ressonância paralela vista deste ponto. As Equações (47) e (48) mostram o cálculo da ordem de ressonância para esta barra.

$$h = \sqrt{\frac{X_{c1}}{X_{L1}}} = \sqrt{\frac{100}{(0,1 + 2)}} = 6,9 \text{ pu} \quad (47)$$

$$f = 6,9 \times 60 = 414 \text{ Hz} \quad (48)$$

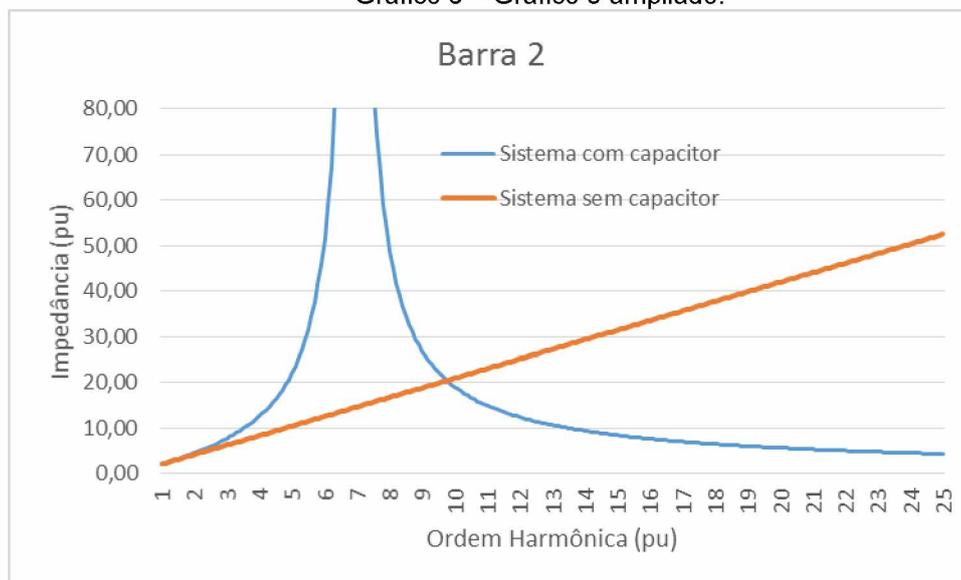
Observa-se que a ressonância ocorre para uma frequência muito próxima da 7ª harmônica. Este sistema foi inserido no programa PCFLO para simulação da impedância harmônica. O programa foi executado com o sistema sem capacitor e com capacitor e foi feito um gráfico comparativo para observar o surgimento de ressonância paralela vista da barra 2 após inserção do capacitor. O resultado pode ser visto no Gráfico 5 e no Gráfico 6.

Gráfico 5 – Impedância Harmônica vista da Barra 2, com Capacitor e sem Capacitor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Gráfico 5 ampliado.



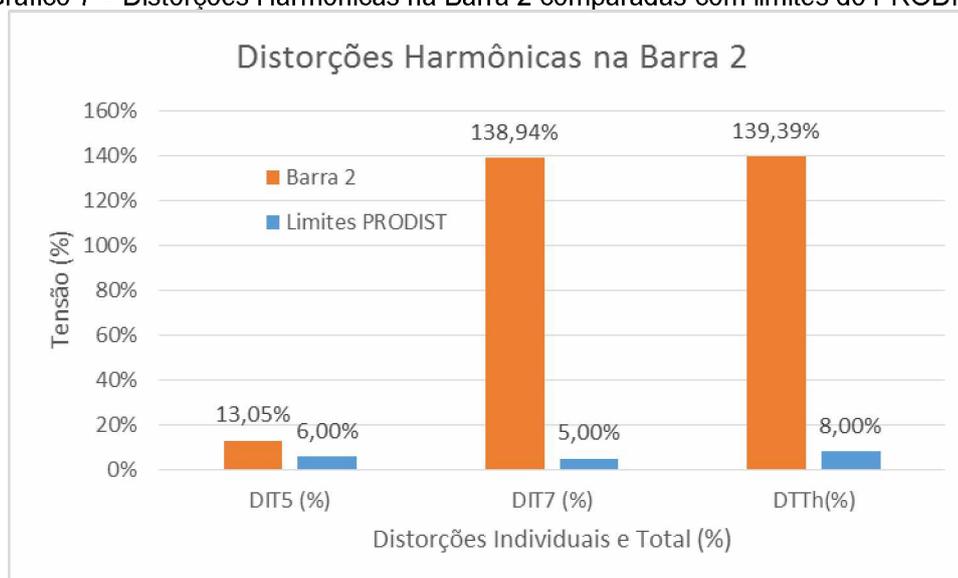
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar os gráficos, nota-se que, com o sistema sem capacitor, a barra 2 possui característica indutiva, pois a impedância varia proporcionalmente com a frequência. Ao inserir o capacitor no sistema, porém, a característica da impedância harmônica vista da barra 2 passa a ter um pico muito alto (tendendo a infinito – 1300 pu) em torno da 7ª ordem, indicando uma ressonância paralela, como calculado na Equação (47).

Como dito na Seção 4.2, se houver injeção de 7ª harmônica na barra 2, poderá surgir uma tensão muito alta desta ordem, podendo ser prejudicial para o capacitor, o que será verificado com a inserção de uma carga não-linear na barra 2. A carga não-linear injeta 10% de 5ª harmônica e 5% de 7ª harmônica na rede e possui 5 Mvar de potência e fator de potência 0,9.

O Gráfico 7 foi elaborado, mostrando as distorções individuais e total de tensão na barra 2, comparadas com os limites do PRODIST para nível de tensão de 13,8 kV.

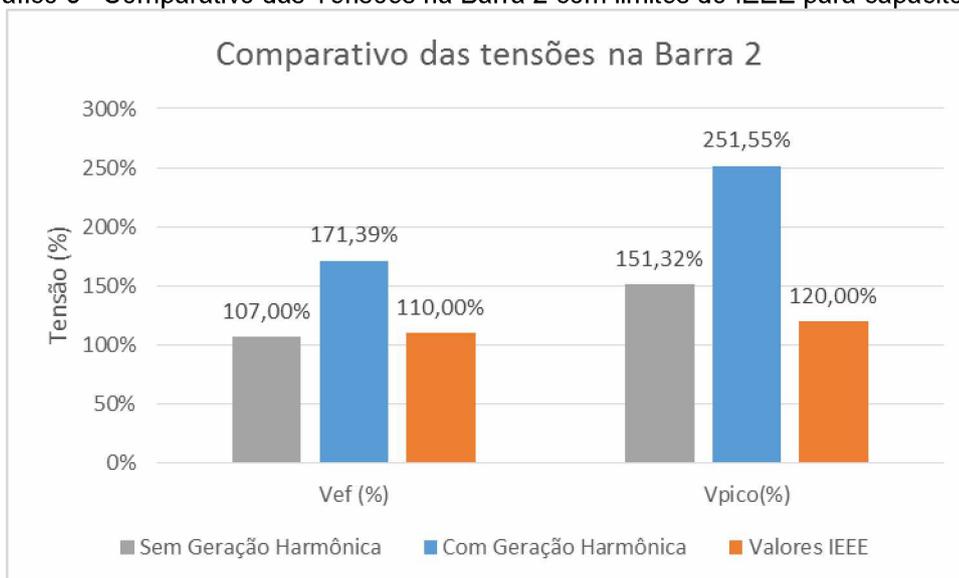
Gráfico 7 – Distorções Harmônicas na Barra 2 comparadas com limites do PRODIST.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi elaborado o Gráfico 8 com as tensões eficazes e de pico da Barra 2, sem e com geração harmônica, comparando com valores limites do IEEE para capacitores, citados na Seção 3.2.2.

Gráfico 8 –Comparativo das Tensões na Barra 2 com limites do IEEE para capacitores.

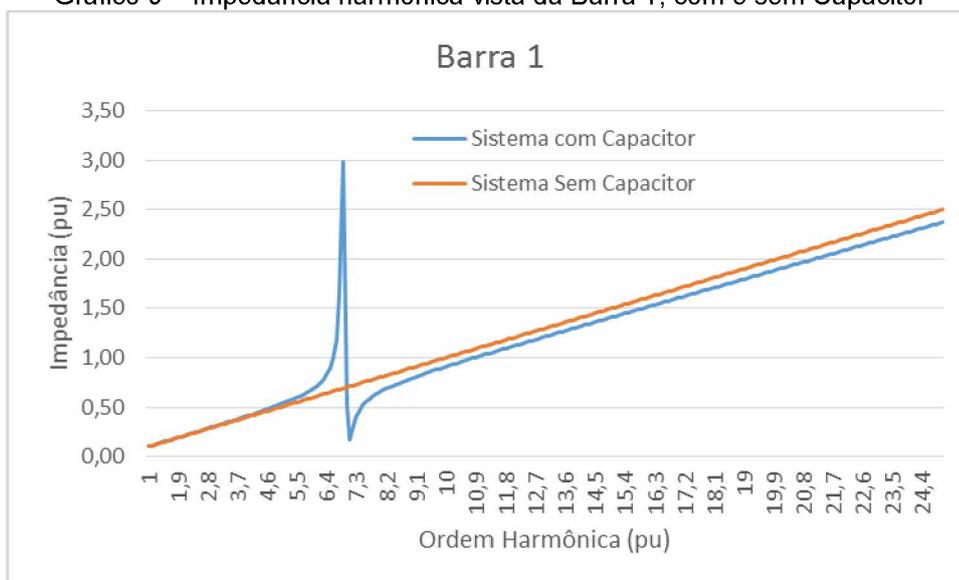


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando este gráfico, nota-se que a tensão na barra 2 realmente foi muito elevada após a inserção da carga não-linear, devido à ressonância paralela de ordem 7. Ainda, verifica-se que os limites de tensão recomendados pelo IEEE para capacitores foram ultrapassados tanto para o valor eficaz quanto para o valor de pico, comprovando o que foi dito a respeito das consequências negativas causadas pela ressonância paralela.

Ainda, com o sistema sem geração harmônica, foi elaborado o Gráfico 9, da impedância harmônica vista da Barra 1.

Gráfico 9 – Impedância harmônica vista da Barra 1, com e sem Capacitor



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico mostra que, com o capacitor na barra 2, a impedância harmônica vista da barra 1, que antes tinha comportamento indutivo, passa a ter um valor muito baixo de impedância em torno da 7ª harmônica, indicando uma ressonância série vista da barra 1. Esta ressonância série é formada pelo conjunto transformador (característica indutiva) e banco de capacitores (característica capacitiva) da barra 2.

Isso significa que, se houver uma fonte geradora de 7ª harmônica na barra 1, esta corrente avistará um circuito de impedância muito baixa à sua frente, preferindo circular por ele, em direção ao banco de capacitores, do que pelo seu curso natural, que seria em direção à fonte de tensão do sistema. Esta corrente harmônica fluindo pelo capacitor pode causar uma série de consequências, como explicado na Seção 4.3.

Com este exemplo, verifica-se que em um mesmo sistema, dependendo de onde houver inserção de harmônicos, pode ocorrer tanto ressonância série quanto ressonância paralela.

5 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Como visto na seção 3.3, as normas e recomendações estabelecem limites para as distorções harmônicas, visando a preservação da rede e seus equipamentos. Para atender a estes limites, faz-se necessário o uso de dispositivos que controlem o nível de harmônicos de alguma forma. Existem três formas básicas de diminuir as distorções harmônicas, que serão comentadas e explicadas neste capítulo. São elas:

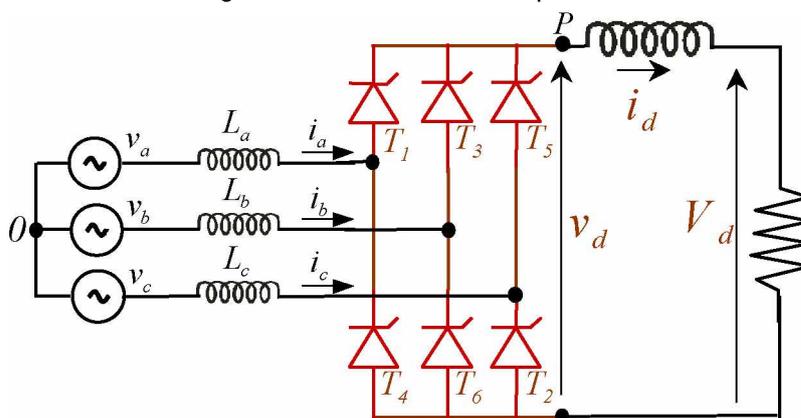
- Aumento do Número de Pulsos;
- Filtros Passivos;
- Filtros Ativos;

5.1 Aumento do Número de Pulsos

Esta implementação é uma forma de compensação intrínseca de harmônicos, ou seja, não é um dispositivo inserido na rede especificamente para a compensação de distorções harmônicas. Pelo contrário, é uma forma de aproveitar o defasamento natural de 120° existente entre as fases do sistema, configurando algumas cargas geradoras de distorções harmônicas de maneira que esta geração seja reduzida.

Seja um retificador de 6 pulsos, como na Figura 29.

Figura 29 – Retificador de 6 pulsos.



As harmônicas geradas por este tipo de retificador são de ordem 5, 7, 11, 13, etc, ou seja, obedece a lei de formação $h = 6k \pm 1$. A forma de onda da corrente e o espectro harmônico se encontram na Figura 30 e na Figura 31.

Figura 30 – Forma de Onda da Corrente de um Retificador de 6 pulsos.

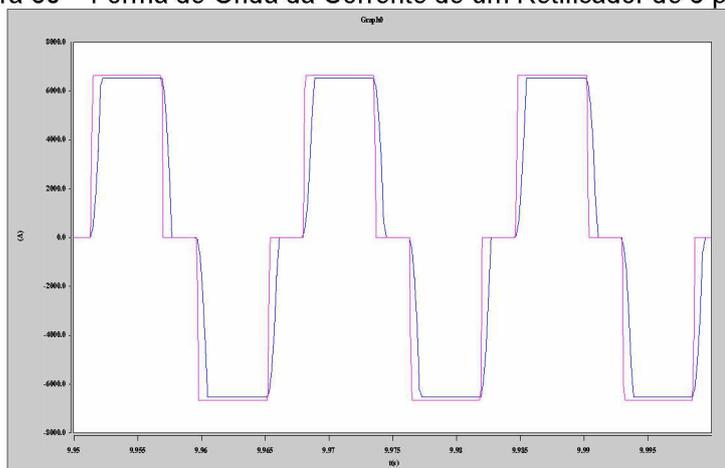
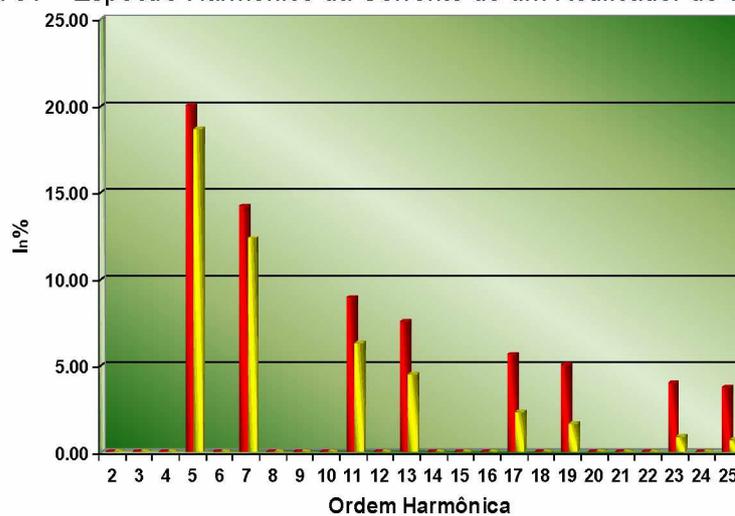
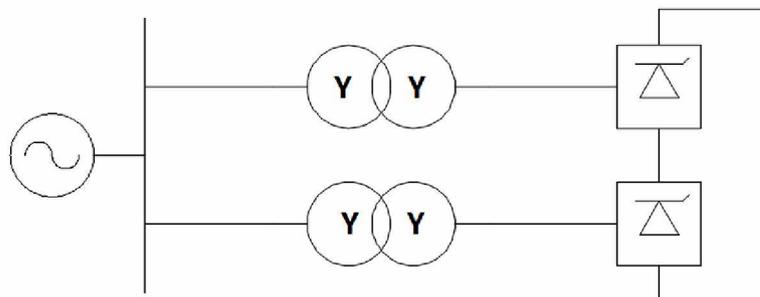


Figura 31 – Espectro Harmônico da Corrente de um Retificador de 6 pulsos.



Para um retificador de 12 pulsos, como na Figura 32, as harmônicas geradas são as mesmas de um retificador de 6 pulsos, ou seja, de ordem 5, 7, 11, 13, etc.

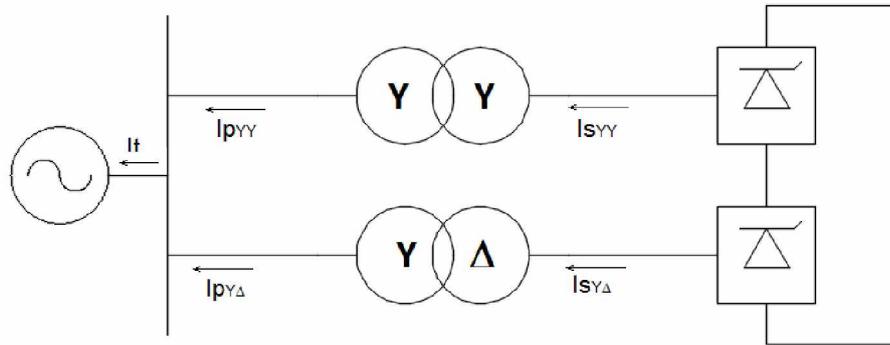
Figura 32 – Retificador de 12 pulsos sem defasamento entre os transformadores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Porém, ao criar o defasamento de 30° , apenas utilizando um dos transformadores com conexão $Y\Delta$, como na Figura 33, elimina-se a 5ª, a 7ª, a 17ª e a 19ª harmônicas, ou seja, as harmônicas geradas passam a ser de ordem 11, 13, 23, 25, etc, com lei de formação $h = 12k \pm 1$. Isso acontece devido à sequência de fase das harmônicas, explicada na seção 2.5.

Figura 33 – Retificador de 12 pulsos com defasamento de 30° entre os transformadores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Eliminação da 5ª harmônica

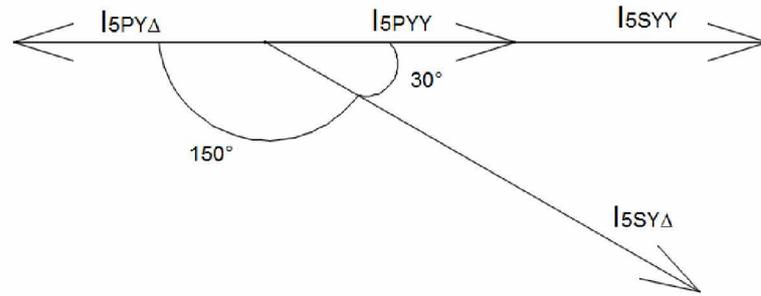
A corrente total de 5ª harmônica inserida na rede é a soma de $I_{5PY\Delta}$ e I_{5PYY} , como na Equação (49).

$$I_{5T} = I_{5PYY} + I_{5PY\Delta} \quad (49)$$

I_{5PYY} não tem defasamento angular em relação a $I_{5SY\Delta}$. I_{5PYY} será tomada como referência.

Devido ao defasamento angular do transformador $Y\Delta$ (30°), $I_{5SY\Delta}$ é 30° defasada de $I_{5SY\Delta}$. Como a corrente de 5ª harmônica é de sequência negativa, em relação ao secundário, $I_{5PY\Delta}$ é defasada $-5 \times 30^\circ$ de $I_{5SY\Delta}$. Assim, o defasamento total de $I_{5PY\Delta}$ em relação a I_{5PYY} é de $-5 \times 30^\circ = -150^\circ + (-30^\circ)$, ou seja, -180° , como no diagrama da Figura 34.

Figura 34 – Diagrama para visualização da eliminação da 5ª harmônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser facilmente visto no diagrama, o resultado da Equação (49) será nulo, eliminando assim, a 5ª harmônica

- Eliminação da 7ª harmônica

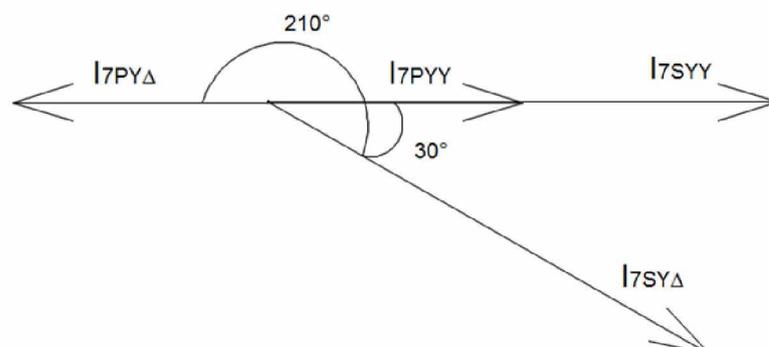
A corrente total de 7ª harmônica inserida na rede é a soma de $I_{7PY\Delta}$ e $I_{7PY\Delta}$, como na Equação (50).

$$I_{7T} = I_{7PY\Delta} + I_{7PY\Delta} \quad (50)$$

$I_{7PY\Delta}$ não tem defasamento angular em relação a $I_{7SY\Delta}$. $I_{7PY\Delta}$ será considerada como referência.

Devido ao defasamento angular do transformador Y Δ (30°), $I_{7SY\Delta}$ é 30° defasada de $I_{7SY\Delta}$. Como a 7ª harmônica possui sequência de fases positiva, em relação ao secundário, $I_{7PY\Delta}$ é defasada $+7 \times 30^\circ$ de $I_{7SY\Delta}$. Assim, o defasamento total de $I_{7PY\Delta}$ em relação a $I_{7PY\Delta}$ é de $7 \times 30^\circ = 210^\circ + (-30^\circ)$, ou seja, 180°, como no diagrama da Figura 35.

Figura 35 – Diagrama para visualização da Eliminação da 7ª Harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser facilmente visto no diagrama, o resultado da Equação (50) será nulo, eliminando assim, a 7^a harmônica.

- Presença da 11^a harmônica

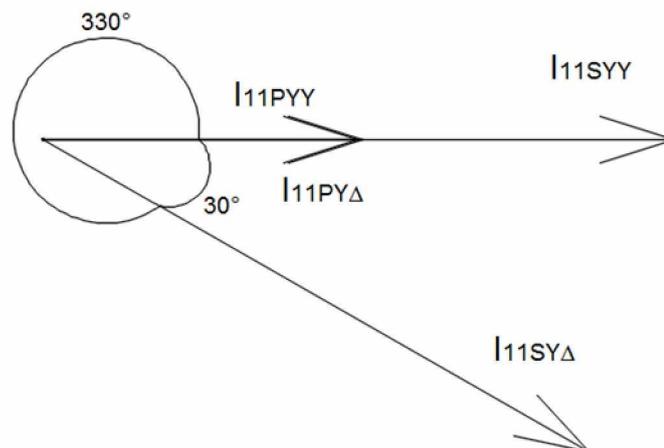
A corrente total de 11^a harmônica inserida na rede é a soma de $I_{11PY\Delta}$ e $I_{11PY\Delta}$.

$$I_{11I} = I_{11PY\Delta} + I_{11PY\Delta} \quad (51)$$

$I_{11PY\Delta}$ não tem defasamento angular em relação a $I_{11SY\Delta}$. $I_{11PY\Delta}$ será considerada como referência.

Devido ao defasamento angular do transformador (30°), $I_{11SY\Delta}$ é 30° defasada de $I_{11SY\Delta}$. Como a 11^a harmônica possui sequência de fases negativa, em relação ao secundário, $I_{11PY\Delta}$ é defasada $-11 \times 30^\circ$ de $I_{11SY\Delta}$. Assim, o defasamento total de $I_{11PY\Delta}$ em relação a $I_{11PY\Delta}$ é de $-11 \times 30^\circ = -330^\circ + (-30^\circ)$, ou seja, -360° , como no diagrama da Figura 36.

Figura 36 – Diagrama para visualização da Presença da 11^a Harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser facilmente visto no diagrama, o resultado da Equação (51) não será nulo, portanto, há presença de 11^a harmônica.

- Presença da 13ª harmônica

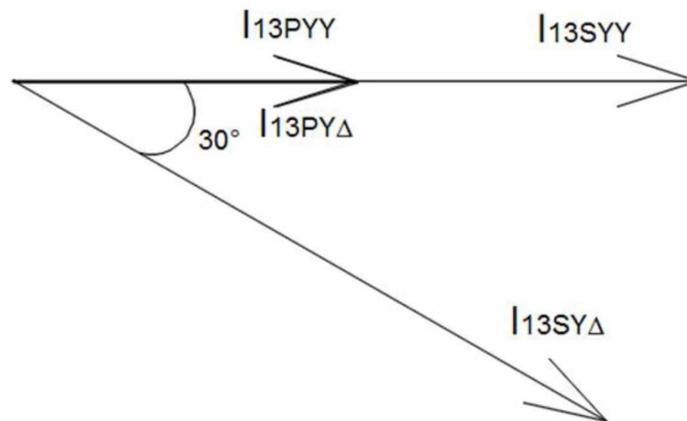
A corrente total de 13ª harmônica inserida na rede é a soma de I_{13PYY} e $I_{13PY\Delta}$, como na Equação (52).

$$I_{13T} = I_{13PYY} + I_{13PY\Delta} \quad (52)$$

I_{13PYY} não tem defasamento angular em relação a I_{13SYY} . I_{13PYY} será considerada como referência.

Devido ao defasamento angular do transformador (30°), $I_{13SY\Delta}$ é 30° defasada de I_{13SYY} . Como a 13ª harmônica possui sequência de fases positiva, em relação ao secundário, $I_{13PY\Delta}$ é defasada $13 \times 30^\circ$ de $I_{13SY\Delta}$. Assim, o defasamento total de $I_{13PY\Delta}$ em relação a I_{13PYY} é de $13 \times 30^\circ = 30^\circ + (-30^\circ)$, ou seja, 0° , como no diagrama da Figura 37.

Figura 37 – Diagrama para visualização da Eliminação da 13ª Harmônica.



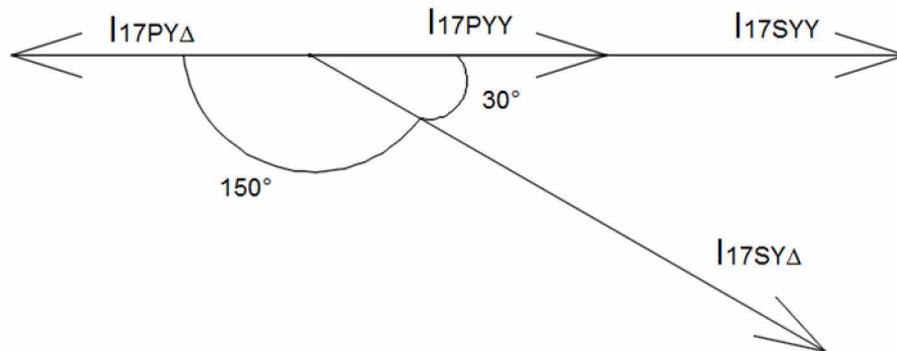
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser facilmente visto no diagrama, o resultado da Equação (52) não será nulo, portanto, há presença de 13ª harmônica.

- Eliminação da 17ª harmônica

Como a 17ª harmônica possui sequência de fases negativa, a análise é feita de forma análoga à análise feita para 5ª harmônica. Assim, o defasamento total de $I_{17PY\Delta}$ em relação a I_{17PYY} é de $17 \times 30^\circ = -150^\circ + (-30^\circ)$, ou seja, -180° , como no diagrama da Figura 38.

Figura 38 – Diagrama para visualização da Eliminação da 17ª Harmônica



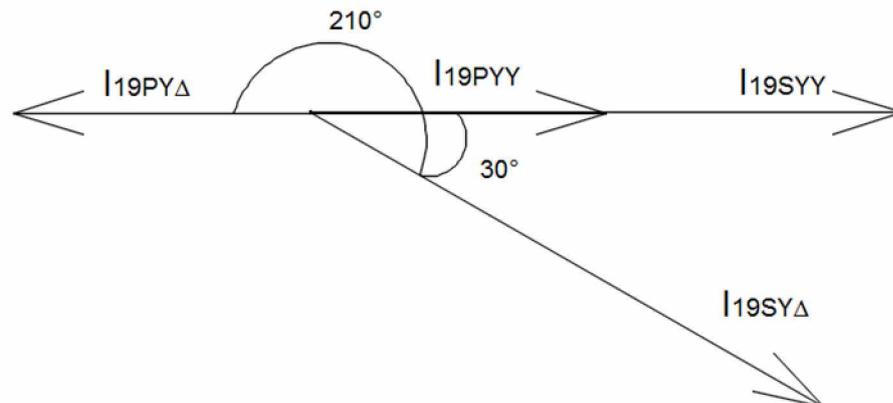
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser facilmente visto no diagrama, a 17ª harmônica é eliminada.

- Eliminação da 19ª harmônica

Como a 19ª harmônica possui sequência de fases positiva, a análise é feita de forma análoga à análise feita para 7ª harmônica. Assim, o defasamento total de $I_{19PY\Delta}$ em relação a I_{19PYY} é de $19 \times 30^\circ = 210^\circ + (-30^\circ)$, ou seja, 180° , como no diagrama da Figura 39.

Figura 39 – Diagrama para visualização da Eliminação da 19ª Harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser facilmente visto no diagrama, a 19ª harmônica é eliminada.

Dessa forma, a análise pode ser feita para todas as harmônicas, observando-se a sequência de fase de cada uma. As harmônicas presentes serão as que obedecem a lei de formação $h = 12k \pm 1$.

Esta estratégia para eliminação de harmônicas pode ser utilizada também aumentando-se o número de pulsos para 18, 24, 30, etc. (inteiros múltiplos de 6), sendo que o defasamento obtido com os transformadores também é diferente para cada número de pulsos, obedecendo a seguinte regra.

- Número de Pulsos: $N_{pulsos} = P$
- Número de transformadores defasadores: $N_{transf} = \frac{P}{6}$
- Defasagem entre os transformadores: $\theta = \frac{360^\circ}{P}$
- Espectro harmônico da corrente total: $h = Pk \pm 1$

Assim, para 12 pulsos, temos 2 transformadores (12/6), ângulo de defasagem entre eles de 30° ($360^\circ/12$), espectro harmônico da corrente: $h = 12k \pm 1$, ou seja, ordens 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49, etc.

Para 24 pulsos, temos 4 transformadores (24/6), ângulo de defasagem entre eles de 15° ($360^\circ/24$), espectro harmônico da corrente: $h = 24k \pm 1$, ou seja, ordens 23, 25, 47, 49, 71, 73, etc. Para obter defasagem de 15° entre os transformadores, faz-se necessário o uso de transformadores com conexão do tipo zigue zague.

Assim, conforme aumenta-se o número de pulsos do retificador, mais ordens harmônicas são eliminadas. Contudo, menor é o defasamento necessário entre os transformadores, o que pode dificultar a aplicação do método.

5.2 Filtros Ativos

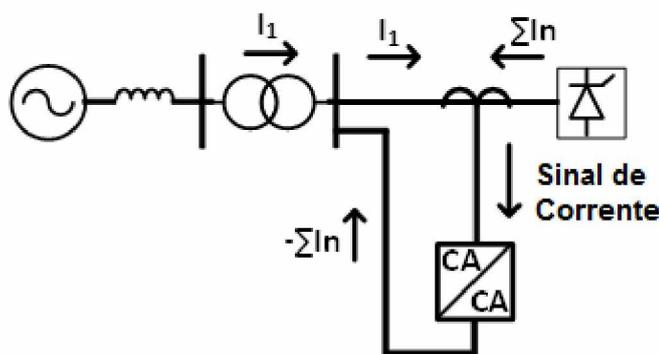
Os filtros ativos são uma solução complexa para a mitigação das distorções harmônicas. O processo é feito por conversores eletrônicos que podem ser inseridos na rede em série ou em paralelo. Os filtros ativos possuem a vantagem de corrigir quantas harmônicas forem necessárias no sistema, e não apenas aquelas para as quais foram projetados, como os filtros passivos.

Seu funcionamento consiste em analisar continuamente as grandezas elétricas do sistema e identificar as distorções harmônicas presentes na rede. Uma forma de utilização dos filtros ativos é tornando a forma de onda da corrente igual à forma de onda da tensão existente. Isso reduz as distorções harmônicas, além de fazer com que o fator de potência seja unitário.

Outra forma de utilização de filtros ativos é produzir e inserir na rede um sinal distorcido igual ao resultante das distorções harmônicas, porém em oposição de fase em relação àquele existente. Os sinais distorcidos que estão em oposição de fase se anulam, eliminando as distorções e restando apenas o sinal fundamental senoidal, como desejado.

Um esquema simples de seu funcionamento na rede se encontra na Figura 40.

Figura 40 – Sistema com Filtro Ativo de Harmônicos.



Os filtros ativos possuem a vantagem de poder monitorar a tensão em vários pontos do sistema para que a correção harmônica seja feita local e remotamente. Infelizmente, ainda é uma aplicação cara, devido à alta eletrônica de potência necessária, e, por isso, geralmente, são menos utilizados do que os filtros passivos.

5.3 Filtros Passivos

Este método para compensação de harmônicos consiste em um dispositivo que é projetado e inserido na rede, no ponto desejado, para controlar as correntes harmônicas. É assim chamado pois apenas utiliza componentes passivos – resistores, capacitores e indutores.

A partir da correta combinação de elementos resistivos, capacitivos e indutivos, conforme a característica de impedância em relação à frequência do arranjo, é possível oferecer um caminho de baixa impedância para a harmônica desejada, para desviá-la do sistema para o aterramento. Assim, para a frequência em questão, deve-se projetar corretamente o filtro para que ele atinja a finalidade pretendida.

Os filtros passivos geralmente são conectados em estrela e podem ser inseridos na rede de duas formas: em série ou em derivação (paralelo). Quando

inserido na rede em série, o filtro é conectado entre pontos de uma mesma fase e, quando conectado à rede em derivação, é inserido em paralelo com a fonte de energia ou com a carga. Esta configuração é a mais empregada nos sistemas, drenando para o aterramento as correntes harmônicas para as quais foi projetado, desviando-as da rede.

Os filtros passivos em derivação, são classificados de acordo com sua característica de impedância com relação à frequência. Eles podem ser amortecidos ou sintonizados, como será explicado a seguir. Neste trabalho será dado maior enfoque aos filtros sintonizados.

5.3.1 Filtros Amortecidos

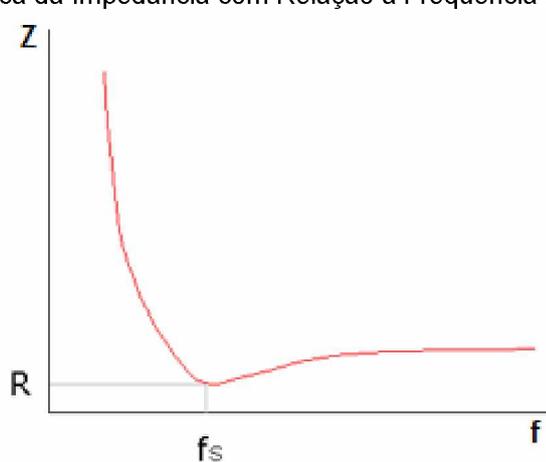
5.3.1.1 Característica da impedância em relação à frequência

Os filtros amortecidos possuem a seguinte característica de impedância com relação à frequência:

- Para frequências menores que a frequência de sintonia ($f < f_0$), são predominantemente capacitivos.
- Para frequência igual à frequência de sintonia ($f = f_0$), são resistivos.
- Para frequências maiores que a frequência de sintonia ($f > f_0$), possuem baixa impedância, predominantemente resistiva.

A característica de impedância com relação à frequência deste tipo de filtro se encontra no Gráfico 10.

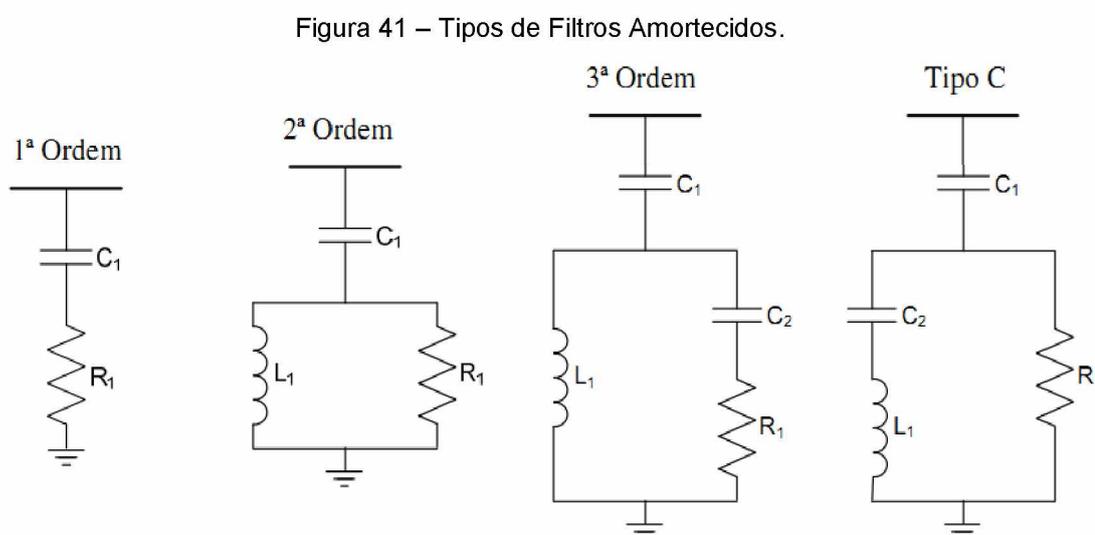
Gráfico 10 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Filtro Amortecido.



Como pode ser observado no Gráfico 10, para a frequência de sintonia (f_s) e frequências acima desta, este tipo de filtro possui impedância baixa, ou seja, ele absorve o harmônico da frequência de sintonia e também os de ordens superiores a ele. Na frequência fundamental, que é sempre abaixo da frequência de sintonia, ele se comporta como capacitor, ou seja, pode ser usado para corrigir fator de potência.

5.3.1.2 Tipos de filtros amortecidos

Os filtros amortecidos podem ser de diversos tipos, de acordo com sua combinação RLC, como mostrado na Figura 41.



5.3.2 Filtros Sintonizados

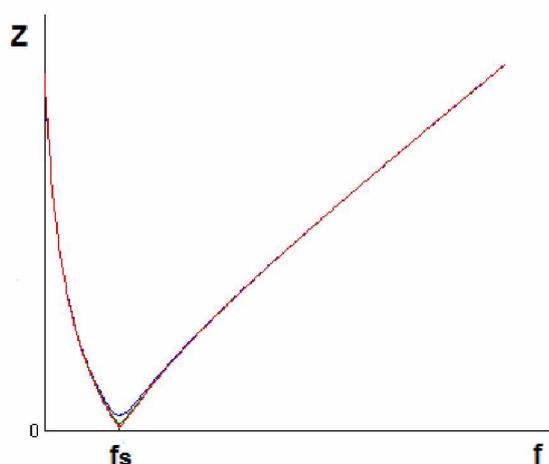
5.3.2.1 Característica da impedância em relação à frequência

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série e sua característica de impedância com relação à frequência é como a seguir:

- Para frequências menores que a frequência de sintonia ($f < f_0$), são predominantemente capacitivos.
- Para frequência igual à frequência de sintonia ($f = f_0$), são resistivos.
- Para frequências maiores que a frequência de sintonia ($f > f_0$), são predominantemente indutivos.

A característica de impedância com relação à frequência de um filtro sintonizado é como no Gráfico 11.

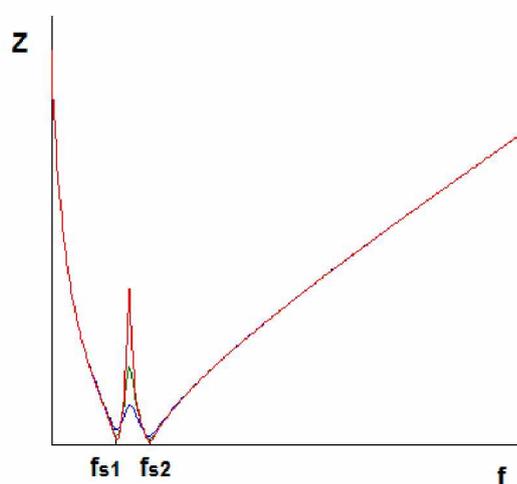
Gráfico 11 – Característica da Impedância com Relação à Frequência de um Filtro Sintonizado.



Como pode ser observado no gráfico, assim como no filtro do tipo amortecido, à frequência fundamental, o filtro sintonizado é capacitivo, podendo corrigir fator de potência, e, na frequência de sintonia (f_s), possui impedância baixa, absorvendo o harmônico desejado. Porém, para harmônicos de ordens superiores, ele é indutivo, ou seja, não os absorve, deixando-os livres pelo sistema. Assim, observa-se que o filtro do tipo sintonizado corrige apenas a frequência de sintonia e não uma faixa de frequências, como o filtro amortecido.

Contudo, é possível combinar seus elementos de forma a sintonizá-lo em mais de uma frequência, ou seja, corrigir mais de uma ordem de harmônicos com um mesmo filtro, o que pode tornar essa solução atrativa financeiramente. A característica da impedância com a frequência de um filtro sintonizado em duas frequências se encontra no Gráfico 12.

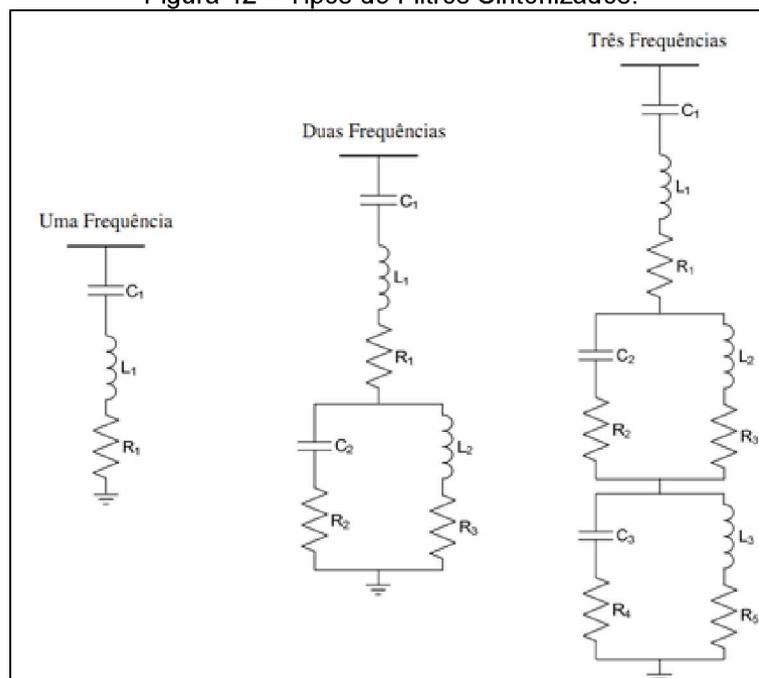
Gráfico 12 – Característica de Impedância com Relação à Frequência de um Filtro Sintonizado em duas Frequências.



5.3.2.2 Tipos de Filtros Sintonizados

Os filtros sintonizados podem ter diversas combinações RLC, de acordo com a finalidade da implementação, como na Figura 42.

Figura 42 – Tipos de Filtros Sintonizados.



Os filtros sintonizados simples, de uma frequência, são bastante utilizados, principalmente para as frequências harmônicas de maiores amplitudes, geralmente as mais baixas (3ª, 5ª, 7ª). Os filtros sintonizados de duas frequências possuem os elementos série e paralelo com impedâncias iguais, sendo que o circuito série sintoniza uma frequência ressonante e o circuito paralelo sintoniza outra frequência diferente. Os filtros de três frequências possuem ainda um segundo circuito paralelo que sintoniza uma terceira frequência ressonante diferente.

5.3.2.3 Frequência de sintonia

Como explicado no Capítulo 4, para um filtro sintonizado simples, que é um circuito série ressonante, haverá uma frequência de ressonância, na qual a impedância equivalente será apenas resistiva, pois a reatância capacitiva e a indutiva se anulam. Esta frequência é dada pela Equação (53).

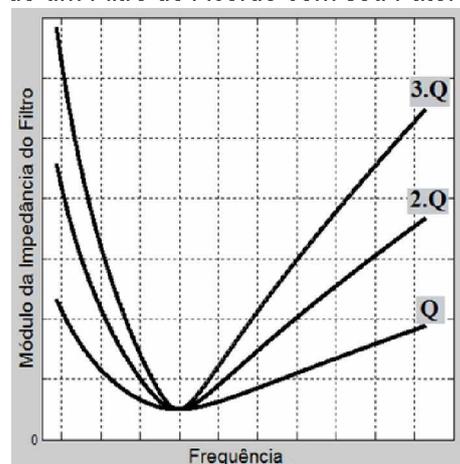
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (53)$$

Isto significa que o filtro deve ser projetado de maneira que esta frequência de ressonância seja igual à frequência harmônica que se deseja absorver. Assim, para esta corrente harmônica específica, o circuito será praticamente resistivo, drenando a componente harmônica para o aterramento.

5.3.2.4 Fator de Qualidade

O fator de qualidade (Q), ou fator de mérito, de um filtro sintonizado determina a sua seletividade, ou seja, o quanto sua impedância varia com a frequência, como mostrado na Figura 43.

Figura 43 – Seletividade de um Filtro de Acordo com seu Fator de Qualidade (Q).



Assim, quanto maior o Q , mais seletivo é o filtro, e quanto menor o Q , menos seletivo. Este parâmetro é definido pela relação entre a potência armazenada e a potência dissipada do circuito. Além disso, determina a perda do filtro na frequência fundamental. É determinado pela Equação (54).

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (54)$$

Porém, a frequência de ressonância do filtro é dada pela Equação (53). Substituindo na Equação (54), o fator de qualidade pode ser determinado como na Equação (55).

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (55)$$

Um valor típico do fator de qualidade de filtros sintonizados é em torno de 40.

5.3.2.5 Processo de dimensionamento de um filtro sintonizado simples

Dimensionar um filtro sintonizado é um processo simples, porém longo e cheio de detalhes. Portanto, é prudente seguir com cautela uma sequência de passos, pois são muitos cálculos a serem feitos. Esta sequência de passos será descrita a seguir, considerando que o local de inserção do filtro já foi definido anteriormente.

1º Passo: Escolher a ordem harmônica do filtro

Primeiramente, deve-se escolher a frequência de sintonia do filtro (f_0), ou seja, qual ordem harmônica ele irá absorver.

É importante tomar o cuidado de projetar o filtro em uma frequência um pouco abaixo da realmente desejada. Isso porque, com o tempo, é provável que o filtro perca unidades capacitivas, o que implica que, para uma mesma frequência, sua reatância capacitiva será maior, como pode ser observado na Equação (56)

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (56)$$

Na prática, diz-se que o filtro “dessintoniza”, ou seja, sua frequência de sintonia, agora, estará deslocada para um valor maior que o original. Assim, se projetarmos um filtro para 7ª harmônica, com ordem de sintonia exatamente igual a 7, após um tempo, quando tiver perdido unidades capacitivas, sua frequência de ressonância ficará acima de 420 Hz. Isso implica que, para a frequência de 420 Hz, ele se comportará como capacitor, o que poderá gerar uma ressonância paralela com a rede, que é predominantemente indutiva, além de não filtrar a harmônica desejada.

Portanto, recomenda-se que a frequência de sintonia do filtro seja definida um pouco abaixo da ordem harmônica desejada. Dessa forma, ainda que ele perca unidades capacitivas, será dessintonizando para mais próximo da ordem 7. Ou seja, o filtro projetado respeitando essa recomendação, com o passar do tempo, com a perda de unidades capacitivas, será mais eficiente do que quando foi originalmente instalado.

Não há consenso sobre a magnitude da dessintonia a ser realizada. A norma IEEE 1531 (*“Guide for Application and Specification of Harmonic Filters”*) indica que deve ser feita 6% abaixo da frequência harmônica [14]. Já Steeper e Stratford [15] sugerem que a sintonia seja feita 5% abaixo da harmônica. Ainda, Almonte e Ashley [16] indicam um deslocamento absoluto de 18 Hz [17].

Assim, será adotada esta última recomendação, para facilidade nos cálculos. Como 18 Hz corresponde à ordem 0,3 pu, a ordem harmônica do filtro será definida como na Equação (57).

$$h = h_0 - 0,3 \quad (57)$$

Em que:

h é a ordem de sintonia do filtro;

h_0 é a ordem harmônica a ser filtrada;

2º Passo: Definir a potência do capacitor do filtro

Para definir a potência do capacitor do filtro, primeiramente, é importante lembrar que sua presença na rede, além de reduzir a distorção harmônica para a qual foi projetado, certamente suprirá reativos para o sistema, visto que, à frequência fundamental, um filtro sintonizado possui característica capacitiva, como explicado na Seção 5.3.2.1. Isto significa que, com a presença do filtro, certamente haverá aumento do fator de potência na barra em que este foi instalado.

Contudo, no dimensionamento de um filtro harmônico, o projetista deverá optar por um objetivo primordial: a redução da distorção harmônica ou o aumento do fator de potência da barra. Caso o projetista tenha como objetivo primordial diminuir a distorção harmônica a um valor predeterminado, o fator de potência naturalmente aumentará; porém, seu valor será conhecido apenas ao final do projeto. Da mesma forma, se o objetivo primordial do projetista for a elevação do fator de potência a um valor predeterminado, a distorção harmônica será reduzida, porém a um valor conhecido apenas ao final do projeto. Desta maneira, não é possível determinar, simultaneamente, a distorção harmônica e o fator de potência pretendidos [18].

Caso o objetivo primordial seja a elevação do fator de potência, a potência reativa do filtro é calculada de forma a atender este objetivo, pela Equação (58).

$$Q_{\text{filtro}} = Q_{\text{atual}} - Q_{\text{final}} \quad (58)$$

Em que:

Q_{filtro} é a potência reativa do filtro, em kvar;

Q_{atual} é a potência reativa atual da carga (sem correção do fator de potência), em kvar;

Q_{final} é a potência reativa final da carga (após a correção do fator de potência), em kvar;

Determinada a potência reativa, calcula-se a reatância total do filtro, dada pela Equação (59).

$$X_{filtro} = \frac{V^2}{Q_{filtro}} \quad (59)$$

Em que:

X_{filtro} é a reatância total do filtro, em Ω ;

V é a tensão da barra, em kV;

Q_{filtro} é a potência reativa do filtro, em kvar;

Agora, deseja-se calcular a reatância capacitiva do filtro. Sabe-se que, na frequência de ressonância, as reatâncias capacitiva e indutiva são iguais, como na Equação (60a), que desenvolvida, torna-se a Equação (60b).

$$\frac{X_{C1}}{h} = h X_{L1} \quad (60a)$$

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h^2} \quad (60b)$$

Em que:

X_C é a reatância capacitiva, em Ω ;

X_L é a reatância indutiva, em Ω ;

h é a ordem harmônica do filtro;

Para calcular a reatância capacitiva, basta lembrar que, à frequência fundamental, o filtro será predominantemente capacitivo, e organizar a equação da

reatância do filtro em termos apenas da reatância capacitiva e da ordem de sintonia, como nas Equações (61a) a (61e).

$$X_{\text{filtro}} = X_C - X_L \quad (61a)$$

$$X_{\text{filtro}} = X_C - \frac{X_C}{h^2} \quad (61b)$$

$$X_{\text{filtro}} = \frac{h^2 X_C - X_C}{h^2} \quad (61c)$$

$$X_{\text{filtro}} = \frac{X_C (h^2 - 1)}{h^2} \quad (61d)$$

$$X_C = \frac{X_{\text{filtro}} \times h^2}{h^2 - 1} \quad (61e)$$

Assim, pode-se calcular a reatância capacitiva do filtro com a Equação (61e). Feito isso, calcula-se o valor da potência reativa do capacitor, segundo a Equação (62).

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} \quad (62)$$

Em que Q_C é a potência reativa do capacitor do filtro.

Encontrado este valor, o mesmo deve ser corrigido para o valor comercial superior mais próximo de Q_C , que será chamado de Q_{Cap} . Dessa forma, a potência do capacitor do filtro, Q_{Cap} , foi determinada.

Caso, porém, o objetivo primordial do projeto seja a diminuição da distorção harmônica, a potência reativa do capacitor do filtro (Q_{Cap}) é determinada inicialmente pelo projetista e alterada, iterativamente, caso seja necessário, de forma a atingir o nível de distorção harmônica desejado. Ou seja, ao final do projeto, se as distorções harmônicas não diminuírem até o valor desejado, o projetista deve incrementar a potência reativa inicial e refazer os cálculos. Ainda, vale lembrar que o ideal é utilizar uma potência reativa mínima que atenda à meta de distorção harmônica, ou seja, o valor inicial escolhido não deve ser muito alto.

O valor da reatância capacitiva do filtro deve ser determinado pela Equação (63) e, por último, calcula-se a capacitância do capacitor segundo a Equação (64).

$$X_{Cap} = \frac{V^2}{Q_{Cap}} \quad (63)$$

$$C = \frac{1}{2\pi 60 X_{Cap}} \quad (64)$$

Em que:

X_{Cap} é a reatância capacitiva do filtro, em Ω ;

V é a tensão da barra, em V;

Q_{Cap} é a potência do banco de capacitores do filtro, no valor comercial, em kvar;

C é a capacitância, em F;

Assim, encontrou-se a potência do capacitor (Q_{Cap}) e a reatância capacitiva do filtro (X_{Cap}).

3º Passo: Determinar o reator do filtro

Neste passo, deseja-se determinar o reator do filtro. Para isso, calcula-se primeiro a reatância indutiva do filtro e, depois, sua indutância, segundo as Equações (65) e (66).

$$X_L = \frac{X_{cap}}{h^2} \quad (65)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega_1} = \frac{X_L}{2\pi 60} \quad (66)$$

Em que:

X_L é a reatância indutiva do filtro, em Ω ;

X_{Cap} é a reatância capacitiva do filtro, definida no passo anterior, em Ω ;

h é a ordem de sintonia do filtro, definida no primeiro passo;

L é a indutância do reator, em mH;

Todos os valores calculados até aqui são referentes à frequência fundamental.

4º Passo: Calcular o resistor do filtro

Para determinar a resistência do filtro, deve-se definir o fator de qualidade desejado para o filtro e utilizar a Equação (67).

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q\sqrt{C}} \quad (67)$$

5º Passo: Calcular valores nominais

Neste passo, objetiva-se calcular os valores nominais de corrente, tensão e potência do filtro, para comparar com os limites estabelecidos pelas normas e analisar a suportabilidade do filtro. Para calcular os valores nominais, é preciso primeiramente calcular os valores fundamentais e harmônicos.

Grandezas fundamentais

Primeiramente, é preciso calcular a impedância do filtro para que se calcule corrente, tensão e potência fundamentais. A reatância total do filtro é dada, em Ω , pela Equação (68):

$$Z_{filtro} = R + j(X_L - X_{Cap}) \quad (68)$$

Agora, pode-se calcular a corrente no filtro, lembrando que o mesmo é um circuito série, pela Equação (69).

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{filtro}} \quad (69)$$

Em que:

I_1 é a corrente de fase fundamental no filtro, em A;

V_1 é a tensão fundamental no filtro, em V;

Z_{filtro} é a impedância do filtro, em Ω ;

Com o valor da corrente de linha, pode-se calcular a tensão fundamental no capacitor do filtro, em V, pela Equação (70), considerando que o filtro está conectado em Y.

$$V^{Y}_{(1)Cap} = I_1 \times X_{Cap} \quad (70)$$

Para um filtro conectado em Δ , a tensão é calculada como na Equação (71).

$$V^{\Delta}_{(1)Cap} = \sqrt{3} V^{Y}_{(1)Cap} \quad (71)$$

Assim, pode-se calcular a potência total do filtro, pela Equação (72).

$$S_1 = \sqrt{3} V_1 \times I_1 \quad (72)$$

Em que:

S_1 é a potência fundamental do filtro, em VA;

V_1 é a tensão fundamental do filtro, em V;

I_1 é a corrente de fase fundamental do filtro, em A;

Grandezas harmônicas

A partir das grandezas fundamentais, é possível calcular facilmente as grandezas harmônicas. A corrente e tensão harmônicas produzidas pela carga já são conhecidas. É necessário, agora, calcular a corrente harmônica vinda da rede para que se conheça a corrente total harmônica que passa pelo filtro. Este cálculo dependerá da configuração do circuito, como na Equação (73).

$$I_{(h)filtro} = I_{(h)carga} + I_{(h)rede} \quad (73)$$

Agora, deseja-se conhecer a tensão de h -ésima harmônica no capacitor, assumindo conexão Y. Portanto, deve-se fazer como na Equação (74).

$$V^{Y}_{(h)Cap} = I_{(h)filtro} \times X_{(h)Cap} \quad (74)$$

Em que:

$V_{(h)Cap}^Y$ é a tensão harmônica de ordem h no capacitor, em V;

$I_{(h)filtro}$ é a corrente harmônica de ordem h no filtro, em A;

$X_{(h)Cap}$ é a reatância capacitiva de ordem h , que é dada por $X_{(h)Cap} = \frac{X_{Cap}}{h}$, em

Ω ;

Para conexão Δ do filtro, a tensão no capacitor é dada pela Equação (75).

$$V_{(h)Cap}^{\Delta} = \sqrt{3} V_{(h)Cap}^Y \quad (75)$$

Agora, calcula-se a tensão, corrente e potência eficazes e tensão de pico do capacitor, como nas Equações (76) a (79) para serem comparadas com os valores nominais e verificar as exigências da norma.

$$I_{(ef)Cap} = \sqrt{I_1^2 + \sum I_h^2} \quad (76)$$

$$V_{(ef)Cap} = \sqrt{V_{(1)Cap}^2 + \sum V_{(h)Cap}^2} \quad (77)$$

$$S_{Cap} = \sqrt{3} V_{(ef)Cap} \times I_{(ef)Cap} \quad (78)$$

$$V_{(pico)} = V_{(1)Cap} + \sum V_{(h)Cap} \quad (79)$$

Os valores limites que devem ser observados para a suportabilidade do capacitor, são da norma ANSI/IEEE 18-1980, e, conforme já foram citados na Seção 3.2.2, são os seguintes:

- Tensão eficaz: Devem suportar até **110%** do valor nominal;
- Corrente Eficaz: Devem suportar até **180%** do valor nominal de fase;
- Potência: Devem suportar até **135%** do valor nominal;
- Tensão de Pico: Devem suportar até **120%** do valor nominal;

Portanto, caso alguma dessas grandezas do capacitor ultrapasse o limite estabelecido pela norma, deve-se rever o projeto do filtro e alterar o que for necessário para atender as recomendações de suportabilidade para o capacitor.

Estes cálculos de suportabilidade são essenciais para um bom projeto de filtro harmônico, para que seu capacitor não seja danificado, prejudicando o funcionamento do filtro.

5.3.3 Melhor local para inserção de um filtro passivo

Os filtros passivos podem ser inseridos em vários locais do sistema, desde bem próximo à sua carga geradora, até em outros pontos mais distantes dela que possam sofrer consequências das distorções harmônicas. A inserção de um filtro passivo próximo à carga geradora de harmônicos parece ser a melhor opção, visto que, evitando sua circulação pela rede, é evitada também uma série de efeitos indesejados, como perdas nos cabos, necessidade de superdimensionar equipamentos e geração de tensões distorcidas, que atrapalham o bom funcionamento de vários aparelhos. Estes e outros efeitos indesejados foram melhor detalhados no Capítulo 3.

Contudo, nem sempre é economicamente viável projetar um filtro para cada carga geradora de harmônicos no sistema, então deve-se buscar locais alternativos estratégicos para a inserção de filtros. Por isso, cada barra do sistema deve ter sua tensão, bem como os índices de distorção harmônica monitorados e observados de acordo com os limites recomendados pelas normas, citados na Seção 3.3, para que se conheça os melhores locais para implementação do filtro.

Para tanto, é recomendado que o engenheiro faça uso de um *software* de simulação que estude o sistema como um todo, que possibilite inserir o filtro em um ponto da rede e alterar sua localização quantas vezes forem necessárias para chegar a uma boa solução antes de finalmente incorporá-la fisicamente ao sistema elétrico. Simulações computacionais são essenciais para prever o comportamento da rede sob diversas situações e, de antemão, pensar em soluções práticas para elas.

Assim, não é possível estabelecer uma regra universal que defina qual a melhor localização de um filtro harmônico. Antes, faz-se necessário um conjunto de cuidados, que incluem a observância das normas e recomendações, mas não apenas isso, como também a antecipação de possíveis problemas a partir de uma detalhada simulação computacional e, principalmente, a experiência e discernimento do engenheiro responsável.

6 ESTUDO DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA

As distorções harmônicas, ao serem geradas por cargas não lineares, são injetadas no sistema elétrico, causando inúmeras consequências indesejáveis a vários tipos de cargas e equipamentos, como descrito no Capítulo 2. Estas consequências não se restringem apenas ao local onde foram geradas as distorções harmônicas, pelo contrário, representam uma ameaça ao sistema todo, pois à medida que estas correntes são inseridas no mesmo, passam a circular por ele, gerando também tensões harmônicas nas barras ao longo da rede.

O estudo de penetração harmônica existe, de modo geral, para analisar um sistema e quantificar seu conteúdo harmônico, ou seja, objetiva-se conhecer o impacto causado pelas distorções harmônicas em todo o sistema. Essencialmente, o estudo é feito para conhecer as tensões harmônicas em cada barra do sistema e também as correntes harmônicas que circulam pelos seus ramos.

O cálculo das tensões harmônicas nas barras é feito utilizando a Equação Matricial (80), para cada ordem harmônica estudada:

$$[V_h] = [Z_h][I_h] \quad (80)$$

Em que:

$[V_h]$ é a matriz de tensões harmônicas nas barras;

$[Z_h]$ é a matriz de impedâncias do sistema;

$[I_h]$ é a matriz de correntes harmônicas injetadas em cada barra.

$[V_h]$ e $[I_h]$ são matrizes coluna e ambas possuem n linhas, sendo n o número de barras do sistema. $[Z_h]$ é uma matriz simétrica, e sua ordem também depende de n .

As correntes harmônicas injetadas no sistema devem ser conhecidas e deseja-se conhecer as tensões harmônicas em cada barra. Para isso, é preciso conhecer a matriz de impedâncias. A maneira mais simples para isso é construir a matriz de admitâncias e invertê-la para encontrar $[Z_h]$, como na Equação (81).

$$[Y_h]^{-1} = [Z_h] \quad (81)$$

Após conhecer as tensões harmônicas nas barras, dadas por $[V_h]$, resultado da Equação (80), calcula-se as correntes harmônicas em cada ramo por meio das tensões das barras que o envolvem e sua respectiva impedância, como na Equação (82).

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \quad (82)$$

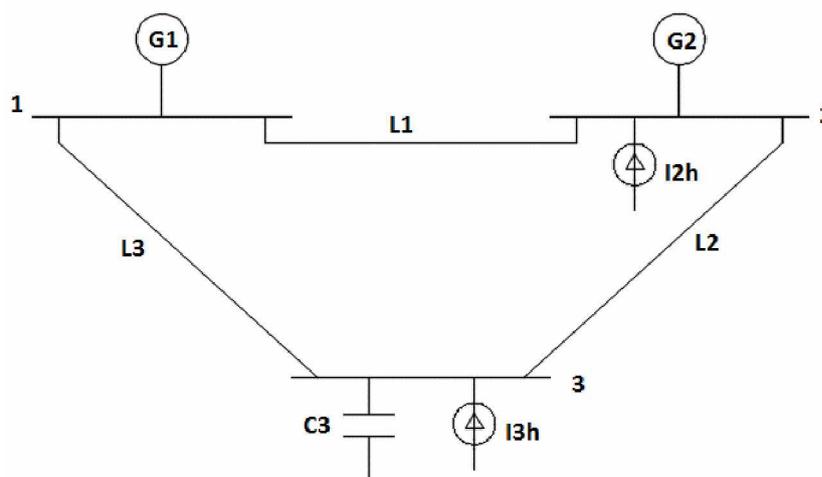
O processo do estudo será descrito detalhadamente nos passos abaixo.

6.1 Construção do Diagrama de Impedâncias

O primeiro passo no estudo é construir o diagrama de impedâncias do sistema para cada ordem harmônica analisada. Será utilizado um sistema genérico, de três barras, para demonstração.

Seja o sistema da Figura 44, composto por três barras ligadas em anel por linhas de transmissão, dois geradores e banco de capacitores. Em duas barras existem fontes de corrente harmônica.

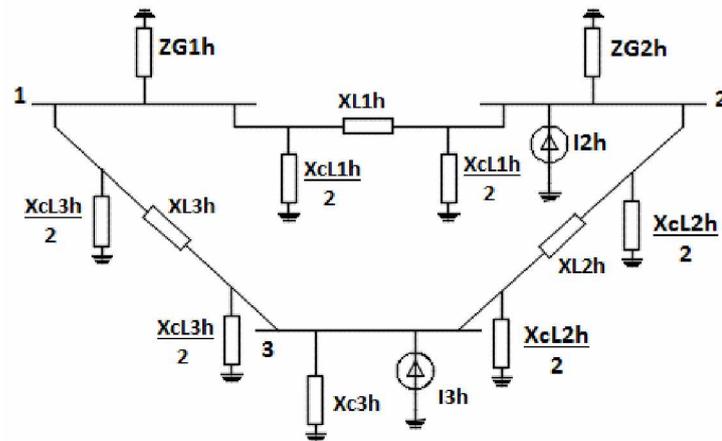
Figura 44 – Sistema Exemplo para Construção do Diagrama de Impedâncias.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama de impedâncias será construído, para demonstração, para uma ordem harmônica genérica h , como na Figura 45.

Figura 45 – Diagrama de Impedâncias do Sistema.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.2 Construção da Matriz Admitância do Sistema

Como já dito anteriormente, este estudo é feito para cada ordem harmônica separadamente, por isso, a matriz admitância será construída para a ordem genérica h , para o sistema de 3 barras, como na Equação (83).

$$[Y_h] = \begin{bmatrix} Y_{11h} & Y_{12h} & Y_{13h} \\ Y_{21h} & Y_{22h} & Y_{23h} \\ Y_{31h} & Y_{32h} & Y_{33h} \end{bmatrix} \quad (83)$$

Cada termo da diagonal principal desta matriz, neste caso, Y_{11h} , Y_{22h} e Y_{33h} , corresponde à soma das admitâncias conectadas diretamente à barra em questão, ou seja, Y_{11h} é a soma das admitâncias conectadas diretamente à barra 1.

Cada termo fora da diagonal principal desta matriz, neste caso, Y_{12h} , Y_{13h} , Y_{21h} , Y_{23h} , Y_{31h} e Y_{32h} , é o negativo da soma das admitâncias conectadas entre as barras em questão, ou seja, Y_{12h} é o negativo da soma das admitâncias conectadas entre as barras 1 e 2.

Assim, os termos da matriz admitância da Equação (83) são calculados como nas Equações (84) a (89).

$$Y_{11h} = \frac{1}{Z_{G1h}} + \frac{1}{Z_{L1h}} + \frac{1}{Z_{L3h}} \quad (84)$$

$$Y_{22h} = \frac{1}{Z_{G2h}} + \frac{1}{Z_{L1h}} + \frac{1}{Z_{L2h}} \quad (85)$$

$$Y_{33h} = \frac{1}{-jX_{C3h}} + \frac{1}{Z_{L2h}} + \frac{1}{Z_{L3h}} \quad (86)$$

$$Y_{12h} = Y_{21h} - \frac{1}{Z_{L1h}} \quad (87)$$

$$Y_{23h} = Y_{32h} = -\frac{1}{Z_{L2h}} \quad (88)$$

$$Y_{13h} = Y_{31h} = -\frac{1}{Z_{L3h}} \quad (89)$$

6.3 Cálculo das Tensões Harmônicas nas Barras

Com a matriz admitância pronta, basta invertê-la para encontrar a matriz de impedâncias, como na Equação (90).

$$[Z_h] = \begin{bmatrix} Y_{11h} & Y_{12h} & Y_{13h} \\ Y_{21h} & Y_{22h} & Y_{23h} \\ Y_{31h} & Y_{32h} & Y_{33h} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11h} & Z_{12h} & Z_{13h} \\ Z_{21h} & Z_{22h} & Z_{23h} \\ Z_{31h} & Z_{32h} & Z_{33h} \end{bmatrix} \quad (90)$$

Feito isto, basta montar a matriz das correntes harmônicas injetadas, como na Equação (91), lembrando que é uma matriz coluna e cada linha corresponde à corrente harmônica injetada em cada barra correspondente, ou seja, I_{1h} é a corrente harmônica injetada na barra 1. Neste exemplo, como não há fonte harmônica na barra 1, $I_{1h} = 0$.

$$[I_h] = \begin{bmatrix} I_{1h} \\ I_{2h} \\ I_{3h} \end{bmatrix} \quad (91)$$

Por fim, basta, descobrir as tensões harmônicas nas barras utilizando a Equação (80), como na Equação (92).

$$\begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \\ V_{h3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11h} & Z_{12h} & Z_{13h} \\ Z_{21h} & Z_{22h} & Z_{23h} \\ Z_{31h} & Z_{32h} & Z_{33h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1h} \\ I_{2h} \\ I_{3h} \end{bmatrix} \quad (92)$$

Em que: V_{h1} , V_{h2} e V_{h3} são as tensões harmônicas presentes nas barras 1, 2 e 3, respectivamente.

6.4 Cálculo das Correntes Harmônicas nos Ramos

Para o cálculo das correntes harmônicas nos ramos, basta utilizar a Equação (82), como na Equação (93), para cada ramo desejado.

$$I_{12h} = \frac{V_{h1} - V_{h2}}{Z_{12h}} \quad (93)$$

Com as informações obtidas no estudo de penetração harmônica, são analisadas as consequências geradas ao longo do sistema causadas por cargas não lineares que injetam as correntes harmônicas no sistema. Tendo quantificado o conteúdo harmônico na rede, pode-se analisar as possíveis soluções para mitigação dessas consequências.

Como se pode observar, este estudo é bastante simples e ao mesmo tempo longo e dispendioso, pois este processo deve ser feito para cada harmônica separadamente, além de que, quanto maior o número de barras do sistema, maiores serão as matrizes dos cálculos, tornando o estudo ainda mais trabalhoso. Tendo em vista uma maior praticidade do estudo e confiabilidade nos cálculos, recomenda-se a utilização de um *software* que execute toda esta rotina de operações para que o engenheiro apenas colha e analise os resultados.

6.5 Programa PCFLO

O programa a ser utilizado para as simulações deste trabalho é o PCFLO, desenvolvido pelo professor Dr. Mack Grady, da Universidade do Texas, nos Estados Unidos, em 2007. Este programa se destina ao estudo de Fluxo de Carga, Curto-Circuito, Análise Harmônica e Análise da Impedância Harmônica de sistemas trifásicos de até 5000 barras.

No Apêndice A deste trabalho, encontra-se as orientações necessárias na utilização do programa para simulações de Análise Harmônica e de Análise da Impedância Harmônica.

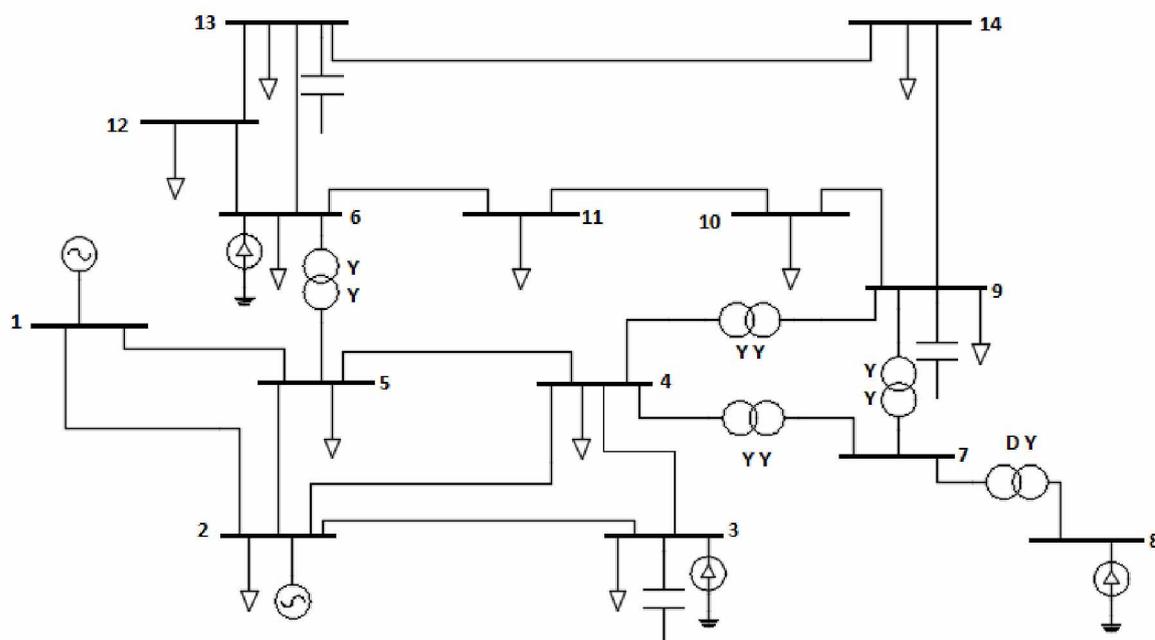
7 ESTUDO DE CASO

Para uma melhor compreensão do assunto estudado neste trabalho, este capítulo destina-se a avaliar um sistema com fontes harmônicas, no qual seja possível fazer o estudo de penetração harmônica e analisar seus resultados, bem como sugerir soluções para o mesmo, caso necessário. O estudo será feito utilizando o programa PCFLO e seus resultados serão comentados e analisados neste capítulo. Contudo, o detalhamento da utilização e funcionamento do programa será feito no Apêndice A deste trabalho.

7.1 Apresentação do sistema a ser estudado

A Figura 46 mostra o sistema a ser estudado. O sistema possui 14 barras, sendo que em duas delas (barras 1 e 2) existem geradores, e em três (barras 3, 6 e 8) existem cargas não-lineares, que são fontes de harmônicos para o sistema. Na maioria das barras do sistema existem cargas, com exceção apenas das barras 1, 7 e 8 e, nas barras 3, 6 e 9 há presença de banco de capacitores. Todas as cargas e banco de capacitores possuem conexão do tipo estrela aterrada.

Figura 46 – Sistema para Análise Harmônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados do sistema são fornecidos nas Tabelas 8 a 12.

Tabela 10 – Dados das Tensões Nominais das Barras.

TENSÕES NOMINAIS DAS BARRAS	
Barra	Tensão Nominal (kV)
1	138,0
2	138,0
3	138,0
4	138,0
5	138,0
6	69,0
7	13,8
8	6,6
9	69,0
10	69,0
11	69,0
12	69,0
13	69,0
14	69,0

Tabela 11 – Dados das Barras do Sistema.

DADOS DE BARRA														
Barra	Tipo	P _G (%)	Q _G (%)	P _L (%)	Q _L (%)	Tensão (pu)	Comp. Reativa (%)	Max Q (%)	Min Q (%)	X Sub. Pos (pu)	X Sub. Neg (pu)	X Sub. Zero (pu)	P Carga Não-linear (%)	Fator de Pot. Carga Não-linear (pu)
1	REF	0,0	0,0	0,0	0,0	1,05	-	100,0	-100,0	0,0001	0,0001	0,0001	-	-
2	PV	40,0	-42,4	21,7	12,7	1,04	-	100,0	-100,0	0,0001	0,0001	0,0001	-	-
3	PQ	0,0	0,0	94,2	19,0	-	-15,0	0,0	0,0	-	-	-	5,45	0,85
4	PQ	0,0	0,0	47,8	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
5	PQ	0,0	0,0	7,6	1,6	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
6	PQ	0,0	0,0	11,2	7,5	-	-	0,0	0,0	-	-	-	30,50	0,90
7	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
8	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-	-	15,00	0,75
9	PQ	0,0	0,0	29,5	16,6	-	-10,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
10	PQ	0,0	0,0	9,0	5,8	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
11	PQ	0,0	0,0	3,5	1,8	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
12	PQ	0,0	0,0	6,1	1,6	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-
13	PQ	0,0	0,0	13,5	5,8	-	-4,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-
14	PQ	0,0	0,0	14,9	5,0	-	-	0,0	0,0	-	-	-	-	-

Tabela 12 – Dados dos Transformadores do Sistema.

DADOS DE TRANSFORMADORES						
Da barra	Para barra	R (pu)	X (pu)	Tape (pu)	Conexão	Phase Shift (graus)
4	7	0,01000	0,20912	0,978	Y - Y	0,0
4	9	0,01000	0,55618	0,969	Y - Y	0,0
5	6	0,01000	0,25201	0,932	Y - Y	0,0
7	8	0,01000	0,17615	1,000	Y - Δ	30,0
7	9	0,01000	0,11001	1,000	Y - Y	0,0

Tabela 13 – Dados das Linhas do Sistema.

DADOS DE LINHA				
Da barra	Para barra	R (pu)	X (pu)	Suscep. (%)
1	2	0,01938	0,05917	5,28%
1	5	0,05403	0,22304	4,92%
2	3	0,04699	0,19797	4,38%
2	4	0,05811	0,17632	3,40%
2	5	0,05695	0,17388	3,46%
3	4	0,06701	0,17103	1,28%
4	5	0,01335	0,04211	0,00%
6	11	0,09498	0,19890	0,00%
6	12	0,12291	0,25581	0,00%
6	13	0,06615	0,13027	0,00%
9	10	0,03181	0,08450	0,00%
9	14	0,12711	0,27038	0,00%
10	11	0,08205	0,19207	0,00%
12	13	0,22092	0,19988	0,00%
13	14	0,17093	0,34802	0,00%

Tabela 14 – Dados das Harmônicas Geradas pelas Cargas Não-Lineares do Sistema.

GERAÇÃO HARMÔNICA DAS CARGAS NÃO-LINEARES			
Barra	Ordem – h	Amplitude (pu)	Ângulo (Graus)
3	1	1	0
	3	0,05	0
	5	0,075	180
	7	0,05	180
	9	0,01	0
	11	0,015	180
	13	0,01	0
	15	0,005	0
6	1	1	0
	3	0,175	0
	5	0,15	180
	7	0,075	180
	9	0,02	0
	11	0,025	180
	13	0,015	0
	15	0,005	0
8	1	1	0
	3	0,07	0
	5	0,2	180
	7	0,075	180
	9	0,01	0
	11	0,015	180
	13	0,015	0
	15	0,005	0

Os dados do sistema foram inseridos no programa para a simulação do fluxo harmônico.

7.2 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos na simulação foram organizados em um quadro resumo que relaciona as distorções totais e individuais de cada barra, bem como sua tensão, como pode ser visto na Tabela 15. Além disso, os valores limites da revisão 7 do módulo 8 do PRODIST, citada na Seção 3.3.1.1, foram transcritos para a planilha como referência de análise do sistema, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 15 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.

Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vn (kV)	138	138	138	138	138	69	13,8	6,6	69	69	69	69	69	69
V1(pu)	1,05	0,995	0,8949	0,8882	0,9011	0,8364	0,8416	0,8105	0,8288	0,8209	0,8244	0,8193	0,8156	0,7996
DTT	0,00%	0,00%	1,38%	1,94%	2,17%	9,72%	4,43%	8,88%	5,42%	5,86%	7,54%	9,44%	9,62%	6,47%
Ordem (h)							DITh (%)							
DIT3	0,00%	0,00%	0,44%	0,82%	0,93%	4,33%	1,60%	1,13%	2,01%	2,37%	3,30%	4,03%	3,92%	2,67%
DIT5	0,00%	0,00%	0,98%	1,39%	1,54%	6,88%	3,43%	7,89%	3,67%	4,09%	5,38%	6,58%	6,60%	4,50%
DIT7	0,00%	0,00%	0,87%	1,06%	1,18%	4,88%	1,86%	2,99%	3,09%	3,33%	4,03%	4,90%	5,13%	3,71%
DIT9	0,00%	0,00%	0,08%	0,18%	0,16%	0,93%	0,62%	0,48%	0,86%	0,72%	0,64%	0,94%	1,01%	0,71%
DIT11	0,00%	0,00%	0,04%	0,13%	0,13%	1,51%	1,02%	1,87%	1,08%	0,62%	0,45%	1,58%	1,73%	0,35%
DIT13	0,00%	0,00%	0,05%	0,03%	0,13%	1,17%	0,62%	1,59%	0,62%	0,33%	0,47%	1,44%	1,77%	0,37%
DIT15	0,00%	0,00%	0,03%	0,01%	0,03%	0,23%	0,05%	0,40%	0,08%	0,02%	0,10%	0,34%	0,48%	0,15%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Limites do PRODIST – Revisão 7 – para os Níveis de Tensão das Barras do Sistema.

Limites PRODIST				
Vn(kV)	6,6	13,8	69	138
DTT(%)	8,00%	8,00%	6,00%	3,00%
Ordem (h)	DIT(%)			
3	5,00%	5,00%	4,00%	2,00%
5	6,00%	6,00%	4,50%	2,50%
7	5,00%	5,00%	4,00%	2,00%
9	1,50%	1,50%	1,50%	1,00%
11	3,50%	3,50%	3,00%	1,50%
13	3,00%	3,00%	2,50%	1,50%
15	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%

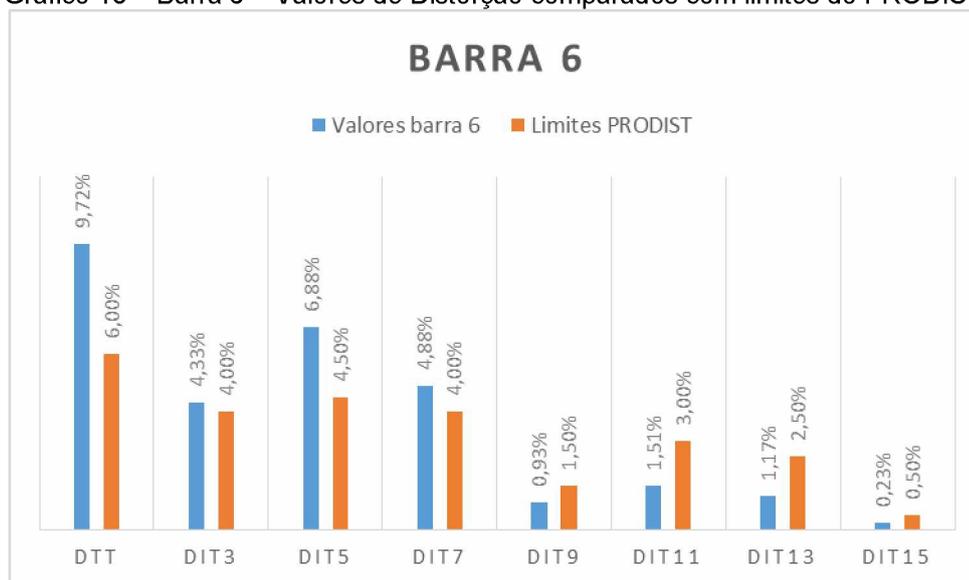
As células em vermelho indicam os valores que ultrapassaram os limites estabelecidos pelo PRODIST. Isso foi feito comparando com os valores da Tabela 16.

Ao observar a Tabela 15, nota-se que os valores recomendados na norma foram ultrapassados em várias barras, tanto de distorção total como individual. Ainda, observa-se que os harmônicos mais críticos são de ordem 3, 5 e 7. Com este exemplo, verifica-se a importância de um estudo de penetração harmônica, pois correntes harmônicas que foram inseridas apenas nas barras 3, 6 e 8 influenciaram

todo o sistema, afetando outras barras além destas. Além disso, observa-se que as maiores distorções individuais ocorreram na 5ª harmônica.

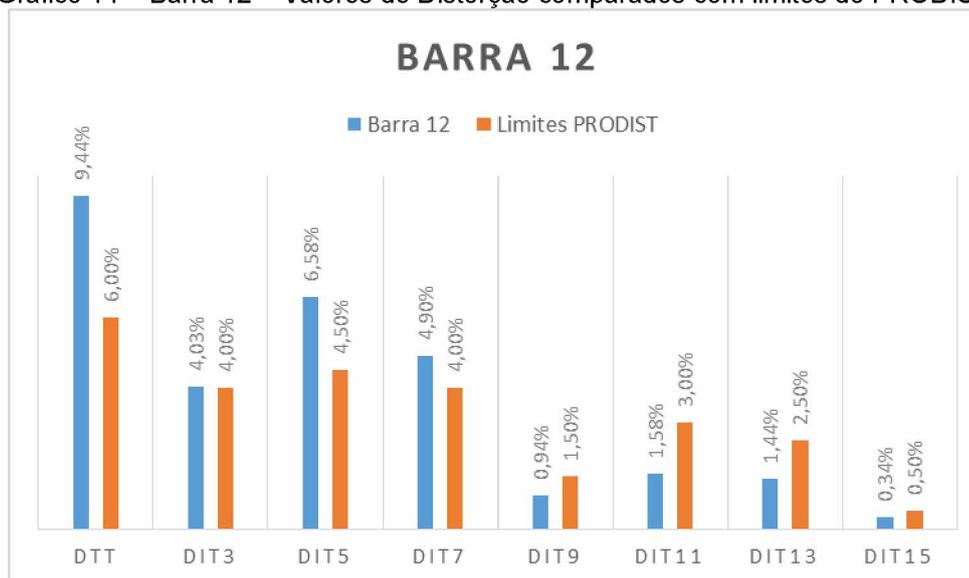
Identificadas as barras com maiores distorções totais, foram feitos gráficos de colunas comparando com os valores de referência da norma, para uma melhor visualização do problema, como pode ser visto do Gráfico 13 ao Gráfico 15.

Gráfico 13 – Barra 6 – Valores de Distorção comparados com limites do PRODIST.



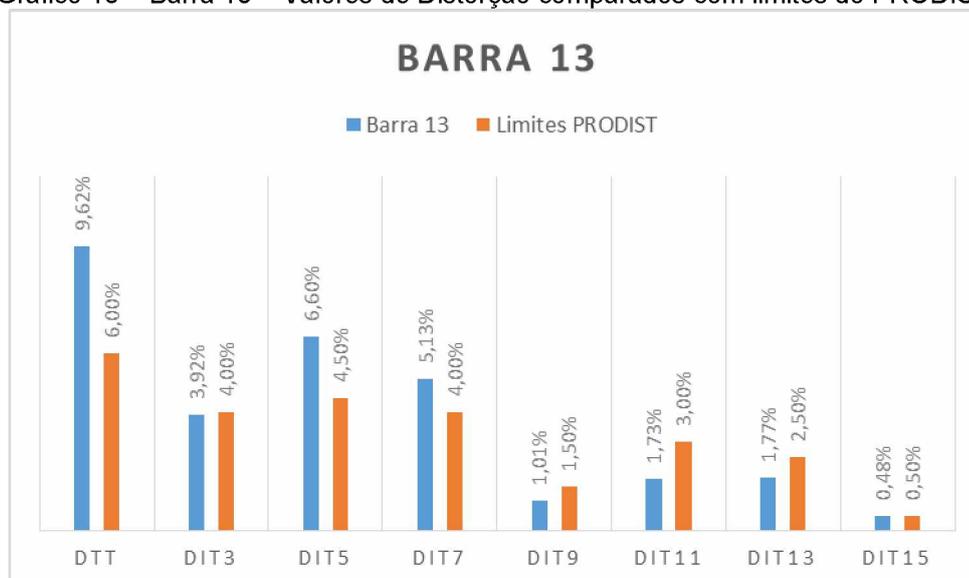
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Barra 12 – Valores de Distorção comparados com limites do PRODIST.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Barra 13 – Valores de Distorção comparados com limites do PRODIST.



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3 Solução Proposta

7.3.1 Projeto de Filtros Harmônicos Sintonizados

Foram projetados filtros harmônicos sintonizados com o intuito de diminuir as distorções harmônicas até não haver mais valores superiores às recomendações do PRODIST. O processo de cálculo de projeto de cada um dos filtros foi feito conforme desenvolvido na seção 5.3.2.5 e descrito a seguir.

7.3.1.1 Filtro para 5º harmônico

- Barra 6

Primeiramente, deseja-se diminuir os níveis de distorção de 5º harmônico no sistema. O local escolhido para a instalação deste filtro é a barra 6, pois é a barra que apresenta maior distorção total (9,72%), além de ser uma fonte de 5º harmônico para o sistema (0,15 pu).

A tensão base na barra 6 é de 69 kV e a impedância base é calculada como nas Equações (94a) e (94b).

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (94a)$$

$$Z_{base} = \frac{(69k)^2}{100M} = 47,61 \Omega \quad (94b)$$

1º Passo: Escolher a ordem harmônica do filtro

Como o filtro é para 5ª harmônica, levando em conta a perda de unidades capacitivas do mesmo, a ordem escolhida para este filtro é de 4,7 pu.

$$h = 4,7 \text{ pu}$$

2º Passo: Definir a potência do capacitor do filtro

O objetivo deste projeto é a diminuição da distorção harmônica, então, a potência reativa do capacitor do filtro (Q_{Cap}) é determinada inicialmente pelo projetista e alterada, iterativamente, caso seja necessário, de forma a atingir o nível de distorção harmônica desejado. Inicialmente, foi adotado o valor de 5 Mvar.

Depois, basta encontrar a reatância capacitiva, em Ω e em pu, como nas Equações (95a) a (96) e a capacitância, pela Equação (97).

$$X_{Cap} = \frac{V^2}{Q_{Cap}} \quad (95a)$$

$$X_{Cap} = \frac{(69k)^2}{5M} = 952,2 \Omega \quad (95b)$$

$$X_{Cap(pu)} = \frac{952,2}{47,61} = 20 \text{ pu} \quad (96)$$

$$C = \frac{1}{2\pi 60 X_{Cap}} = 2,786 \mu\text{F} \quad (97)$$

3º Passo: Determinar o reator do filtro

Neste passo, deseja-se determinar o reator do filtro. Para isso, calcula-se primeiro a reatância indutiva do filtro, em Ω , como nas Equações (98a) e (98b) e em pu, como na Equação (99) e, depois, sua indutância, como na equação (100).

$$X_L = \frac{X_{Cap}}{h^2} \quad (98a)$$

$$X_L = \frac{952,2}{4,7^2} = 43,106 \Omega \quad (98b)$$

$$X_{L(\text{pu})} = \frac{43,106}{47,61} = 0,905 \text{ pu} \quad (99)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi 60} = 114,34 \text{ mH} \quad (100)$$

4º Passo: Determinar o resistor do filtro

Utilizando $Q = 40$ (valor típico), o cálculo do resistor é feito como nas Equações (101a) a (102).

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (101a)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{114,34 \times 10^{-3}}{2,786 \times 10^{-6}}}}{40} = 5,065 \Omega \quad (101b)$$

$$R_{(\text{pu})} = \frac{5,065}{47,61} = 0,106 \text{ pu} \quad (102)$$

A reatância total do filtro é dada, em Ω , pelas Equações (103a) e (103b) e, em pu, pela Equação (104).

$$X_{\text{filtro}} = X_L - X_{\text{Cap}} \quad (103a)$$

$$X_{\text{filtro}} = 43,106 - 952,2 = -909,094 \Omega \quad (103b)$$

$$X_{\text{filtro}} = \frac{-909,094}{47,61} = -19,094 \text{ pu} \quad (104)$$

Todos os parâmetros calculados até aqui são para frequência fundamental.

Com todos os parâmetros do filtro calculados, este foi inserido no sistema para simulação. A Tabela 17 contém os resultados obtidos.

Tabela 17 – Sistema com Filtros de 5º Harmônico na Barra 6 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.

Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vn (kV)	138	138	138	138	138	69	13,8	6,6	69	69	69	69	69	69
V1(pu)	1,05	0,9984	0,9011	0,8957	0,9083	0,8548	0,8533	0,8226	0,8421	0,8353	0,8408	0,8377	0,8338	0,8155
DTT	0,00%	0,00%	1,21%	1,64%	1,66%	6,85%	4,78%	9,91%	4,78%	4,78%	5,51%	6,69%	6,87%	4,91%
Ordem (h)	DITh (%)													
DIT3	0,00%	0,00%	0,47%	0,90%	1,03%	4,71%	1,75%	1,09%	2,20%	2,59%	3,60%	4,38%	4,26%	2,91%
DIT5	0,00%	0,00%	0,71%	0,97%	0,79%	2,60%	3,80%	8,87%	2,90%	2,61%	2,38%	2,52%	2,57%	2,30%
DIT7	0,00%	0,00%	0,85%	0,96%	1,01%	3,81%	1,98%	3,54%	2,82%	2,93%	3,33%	3,86%	4,08%	3,13%
DIT9	0,00%	0,00%	0,08%	0,16%	0,14%	0,80%	0,54%	0,47%	0,74%	0,62%	0,55%	0,81%	0,86%	0,61%
DIT11	0,00%	0,00%	0,05%	0,11%	0,11%	1,31%	0,90%	1,73%	0,91%	0,51%	0,40%	1,38%	1,51%	0,27%
DIT13	0,00%	0,00%	0,05%	0,02%	0,12%	1,05%	0,58%	1,54%	0,54%	0,29%	0,45%	1,31%	1,61%	0,36%
DIT15	0,00%	0,00%	0,03%	0,01%	0,02%	0,22%	0,04%	0,39%	0,07%	0,02%	0,10%	0,32%	0,45%	0,15%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela revela que, após a inserção deste filtro, além de ter diminuído significativamente as distorções de 7ª harmônica, não há mais violação da norma para ordem 5 na maioria das barras. Agora deseja-se colocar outro filtro de 5º harmônico no sistema, porém agora, na barra 8, que também possui carga geradora de harmônicos e é a que mais injeta harmônico de ordem 5 na rede (0,2 pu).

- Barra 8

A tensão base na barra 8 é de 6,6 kV e a impedância base é calculada como nas Equações (105a) e (105b).

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (105a)$$

$$Z_{base} = \frac{(6,6k)^2}{100M} = 0,4356 \Omega \quad (105b)$$

1º Passo: Escolher a ordem harmônica do filtro

Como o filtro é para 5ª harmônica, levando em conta a perda de unidades capacitivas do mesmo, a ordem escolhida para este filtro é de 4,7 pu.

$$h = 4,7 \text{ pu}$$

2º Passo: Definir a potência do capacitor do filtro

O objetivo deste projeto é a diminuição da distorção harmônica, então, a potência reativa do capacitor do filtro (Q_{Cap}) é determinada inicialmente pelo

projetista e alterada, caso seja necessário, de forma a atingir o nível de distorção harmônica desejado. Inicialmente, foi adotado o valor de 5 Mvar.

Depois, basta encontrar a reatância capacitiva, em Ω e em pu, como nas Equações (106a) a (107) e a capacitância, pela Equação (108).

$$X_{Cap} = \frac{V^2}{Q_{Cap}} \quad (106a)$$

$$X_{Cap} = \frac{(6,6k)^2}{5M} = 20 \Omega \quad (106b)$$

$$X_{Cap(pu)} = \frac{20}{0,4356} = 8,712 \text{ pu} \quad (107)$$

$$C = \frac{1}{2\pi 60 X_{cap}} = 304,47 \mu\text{F} \quad (108)$$

3º Passo: Determinar o reator do filtro

Neste passo, deseja-se determinar o reator do filtro. Para isso, calcula-se primeiro a reatância indutiva do filtro, em Ω , como nas Equações (109a) e (109b), e em pu, como na Equação (110) e, depois, sua indutância, como na Equação (111).

$$X_L = \frac{X_{Cap}}{h^2} \quad (109a)$$

$$X_L = \frac{20}{4,7^2} = 0,394 \Omega \quad (109b)$$

$$X_{L(pu)} = \frac{0,394}{0,4356} = 0,905 \text{ pu} \quad (110)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi 60} = 1,046 \text{ mH} \quad (111)$$

4º Passo: Determinar o resistor do filtro

Utilizando $Q = 40$ (valor típico), o cálculo do resistor é feito como nas Equações (112a) a (113).

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (112a)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{1,046 \times 10^{-3}}{304,47 \times 10^{-6}}}}{40} = 0,046 \, \Omega \quad (112b)$$

$$R_{(pu)} = \frac{0,046}{0,4356} = 0,1064 \, pu \quad (113)$$

A reatância total do filtro é dada, em Ω e em pu, pelas Equações (114a) a (115).

$$X_{filtro} = X_L - X_{Cap} \quad (114a)$$

$$X_{filtro} = 0,394 - 8,712 = -8,318 \, \Omega \quad (114b)$$

$$X_{filtro} = \frac{8,318}{0,4356} = -19,09 \, pu \quad (115)$$

Todos os parâmetros calculados até aqui são para frequência fundamental.

Com todos os parâmetros do filtro calculados, o mesmo foi inserido no sistema para simulação. A Tabela 18 contém os resultados obtidos.

Tabela 18 – Sistema com Filtros de 5º Harmônico nas Barras 6 e 8 – Resumo dos Resultados Obtidos na Simulação.

Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vn (kV)	138	138	138	138	138	69	13,8	6,6	69	69	69	69	69	69
V1(pu)	1,05	1,0017	0,9072	0,9033	0,9149	0,8667	0,8692	0,8472	0,8567	0,8495	0,854	0,8501	0,8464	0,8296
DTT	0,00%	0,00%	1,00%	1,28%	1,44%	6,42%	2,55%	3,63%	3,47%	3,75%	4,90%	6,21%	6,33%	4,17%
Ordem (h)	DTh (%)													
DIT3	0,00%	0,00%	0,46%	0,88%	1,01%	4,58%	1,70%	1,19%	2,13%	2,51%	3,50%	4,26%	4,14%	2,82%
DIT5	0,00%	0,00%	0,50%	0,46%	0,53%	2,32%	0,88%	2,09%	1,08%	1,26%	1,76%	2,21%	2,21%	1,44%
DIT7	0,00%	0,00%	0,72%	0,78%	0,85%	3,42%	1,32%	2,07%	2,19%	2,35%	2,84%	3,43%	3,60%	2,61%
DIT9	0,00%	0,00%	0,08%	0,15%	0,14%	0,78%	0,52%	0,35%	0,72%	0,60%	0,53%	0,79%	0,84%	0,59%
DIT11	0,00%	0,00%	0,05%	0,12%	0,12%	1,23%	0,77%	1,27%	0,87%	0,51%	0,39%	1,28%	1,41%	0,36%
DIT13	0,00%	0,00%	0,04%	0,03%	0,11%	0,98%	0,48%	1,14%	0,48%	0,23%	0,40%	1,21%	1,49%	0,34%
DIT15	0,00%	0,00%	0,02%	0,01%	0,02%	0,21%	0,04%	0,30%	0,07%	0,02%	0,10%	0,31%	0,44%	0,14%

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela mostra que, após a inserção deste filtro, não ocorre mais violação dos limites do PRODIST para ordem 5 no sistema. Agora, existe violação dos limites da PRODIST apenas para ordem 3.

7.3.1.2 Filtro para 3º harmônico

O local escolhido para a instalação deste filtro é novamente a barra 6, pois é a que injeta maior quantidade de 3º harmônico no sistema (0,175 pu) e também a que apresenta maior distorção individual de ordem 3 (4,58%). Assim, reduzindo a corrente harmônica logo na fonte, ela não circulará pelo sistema afetando outras barras.

A tensão base na barra 6 é de 69 kV e a impedância base é de 47,61 Ω , calculada anteriormente.

1º Passo: Escolher a ordem do filtro

Como o filtro é para 3ª harmônica, levando em conta a perda de unidades capacitivas do mesmo, a ordem escolhida para este filtro é de 2,7 pu.

$$h = 2,7 \text{ pu}$$

2º Passo: Definir a potência do capacitor do filtro

O objetivo deste projeto é a diminuição da distorção harmônica, então, a potência reativa do capacitor do filtro (Q_{Cap}) é determinada inicialmente pelo projetista e alterada, caso seja necessário, de forma a atingir o nível de distorção harmônica desejado. Inicialmente, foi adotado o valor de 5 Mvar.

Depois, basta encontrar a reatância capacitiva, em Ω e em pu, como nas Equações (116a) a (117) e a capacitância, pela Equação (118).

$$X_{Cap} = \frac{V^2}{Q_{Cap}} \quad (116a)$$

$$X_{Cap} = \frac{(69k)^2}{5M} = 952,2 \Omega \quad (116b)$$

$$X_{Cap(pu)} = \frac{952,2}{47,61} = 20 \text{ pu} \quad (117)$$

$$C = \frac{1}{2\pi 60 X_{Cap}} = 2,786 \mu\text{F} \quad (118)$$

3º Passo: Determinar o reator do filtro

Neste passo, deseja-se determinar o reator do filtro. Para isso, calcula-se primeiro a reatância indutiva do filtro, em Ω e em pu, como nas Equações (119a) a (120) e, depois, sua indutância, como na Equação (121).

$$X_L = \frac{X_{Cap}}{h^2} \quad (119a)$$

$$X_L = \frac{952,2}{2,7^2} = 130,617 \Omega \quad (119b)$$

$$X_{L(pu)} = \frac{130,617}{47,61} = 2,743 \text{ pu} \quad (120)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi 60} = 346,47 \text{ mH} \quad (121)$$

4º Passo: Determinar o resistor do filtro

Utilizando $Q = 40$ (valor típico), o cálculo do resistor é feito como nas Equações (122a) a (123).

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (122a)$$

$$R = \frac{\sqrt{\frac{346,47 \times 10^{-3}}{2,786 \times 10^{-6}}}}{40} = 8,817 \Omega \quad (122b)$$

$$R_{(pu)} = \frac{8,817}{47,61} = 0,185 \text{ pu} \quad (123)$$

A reatância total do filtro é dada, em Ω , em pu, pelas Equações (124a) a (125).

$$X_{filtro} = X_L - X_{Cap} \quad (124a)$$

$$X_{filtro} = 130,617 - 952,2 = -821,583 \Omega \quad (124b)$$

$$X_{filtro} = \frac{-821,583}{47,61} = -17,256 \text{ pu} \quad (125)$$

- $V_{ef}(\%)$ é a tensão eficaz resultante no capacitor, em relação à tensão fundamental. É calculada pelas tensões fundamental e harmônicas no capacitor, obtidas no resultado do fluxo harmônico, pela expressão $V_{ef(\%)} = \sqrt{V_1^2 + \sum V_h^2}$;
- $V_{pico}(\%)$ é a tensão de pico resultante no capacitor, em relação à fundamental. É calculada pelas tensões fundamental e harmônicas fornecidas pelo fluxo harmônico, pela expressão $V_{pico(\%)} = V_1 + \sum V_h$;
- $I_{ef}(\%)$ é a corrente eficaz resultante no capacitor, em relação à corrente fundamental, calculada pelas correntes fundamental e harmônicas fornecidas pelo fluxo harmônico, pela expressão $I_{ef(\%)} = \sqrt{I_1^2 + \sum I_h^2}$;
- $V_{ef}(\text{kV})$ é a tensão eficaz resultante no capacitor. É calculada pela expressão $V_{ef(\text{kV})} = V_{ef(\%)} \times V_{n1}$;
- $I_{ef}(\text{A})$ é a corrente eficaz resultante no capacitor. É calculada pela expressão $I_{ef(\text{kV})} = I_{ef(\%)} \times I_{n1}$;
- $S(\text{MVA})$ é a potência resultante no capacitor. É calculada pela expressão $S = \sqrt{3} V_{ef} \times I_{ef}$;
- $S(\%)$ é a potência resultante no capacitor, em relação à fundamental. É calculada pela expressão $S_{(\%)} = \frac{S}{Q_{n1}}$;

Os resultados dos cálculos foram comparados com os valores da Tabela 21.

Tabela 21 – Limites IEEE para Capacitores.

Limites IEEE 18-2002 para Capacitores	
Vef	110,00%
Ief	180,00%
Q	135,00%
Vpico	120,00%

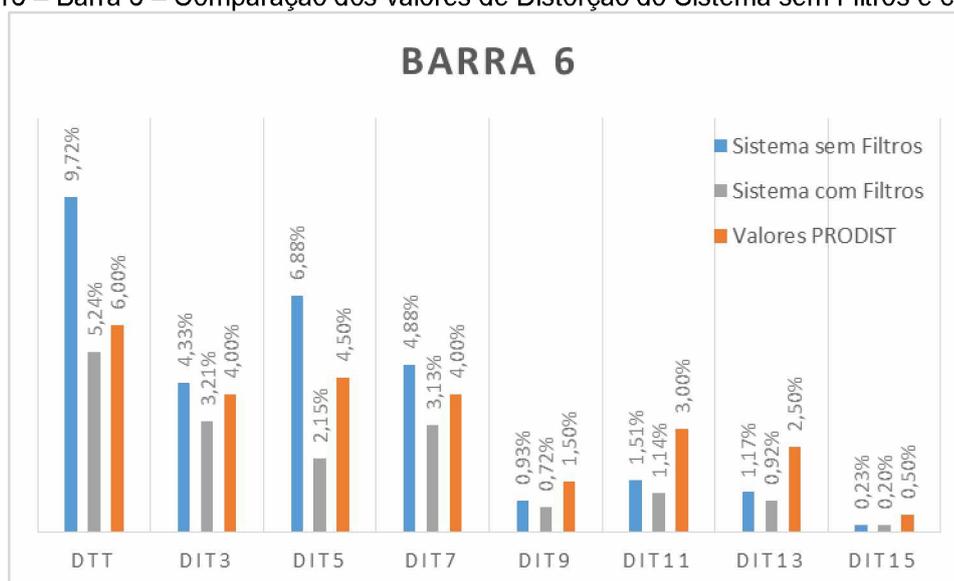
Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que os limites da norma foram respeitados.

7.3.1.4 Comparações do Sistema Antes e Após a Inserção dos Filtros

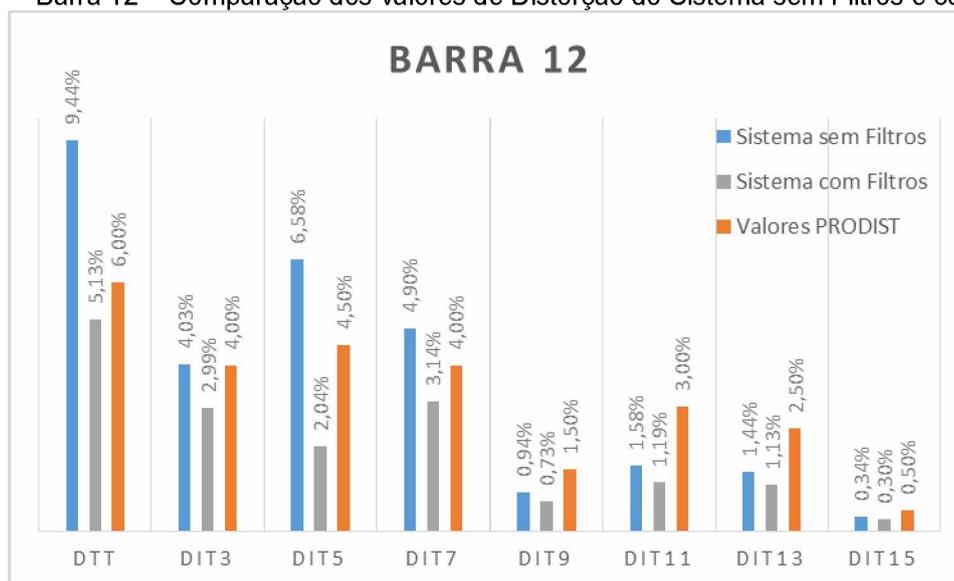
Foram feitos gráficos comparativos dos valores das distorções harmônicas das barras 6, 12 e 13 antes e depois da inserção dos filtros, tendo os limites do PRODIST como referência. Estes podem ser vistos do Gráfico 16 ao Gráfico 18.

Gráfico 16 – Barra 6 – Comparação dos valores de Distorção do Sistema sem Filtros e com Filtros.



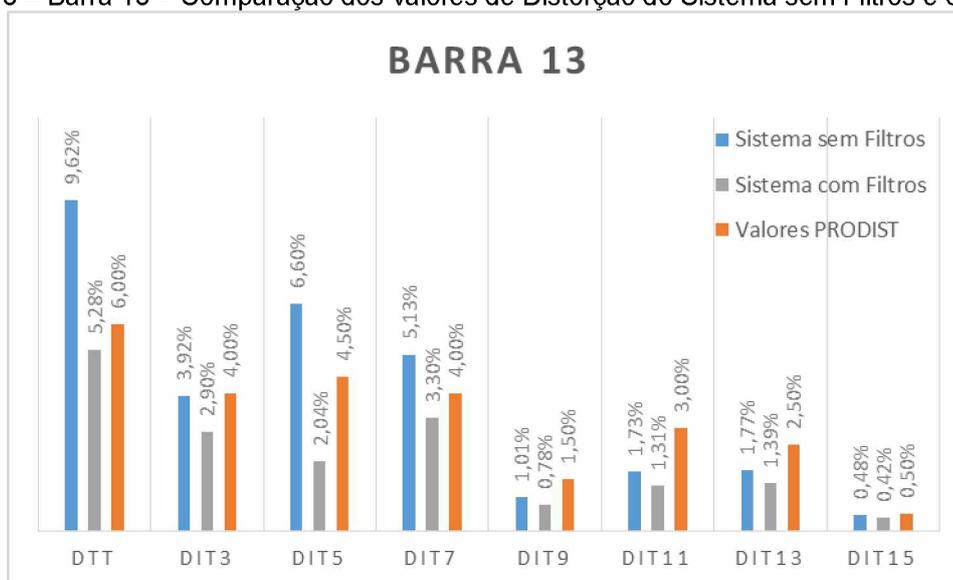
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 17 – Barra 12 – Comparação dos valores de Distorção do Sistema sem Filtros e com Filtros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

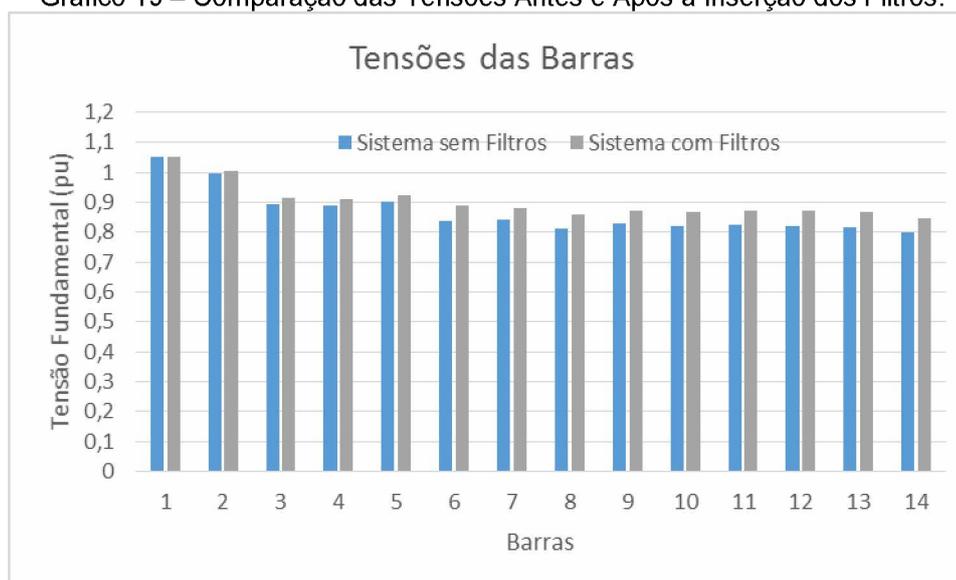
Gráfico 18 – Barra 13 – Comparação dos valores de Distorção do Sistema sem Filtros e com Filtros.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda, notou-se uma elevação significativa nas tensões fundamentais das barras após a inserção dos filtros. Para demonstrar este fato, foi feito um gráfico comparativo das tensões fundamentais das barras antes e depois da inserção dos filtros, que pode ser visto no Gráfico 19.

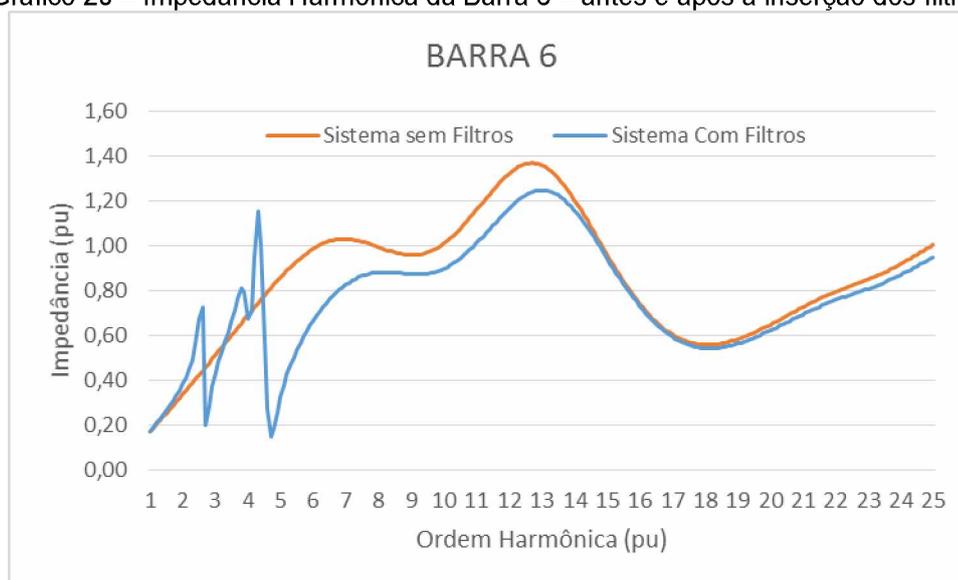
Gráfico 19 – Comparação das Tensões Antes e Após a Inserção dos Filtros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

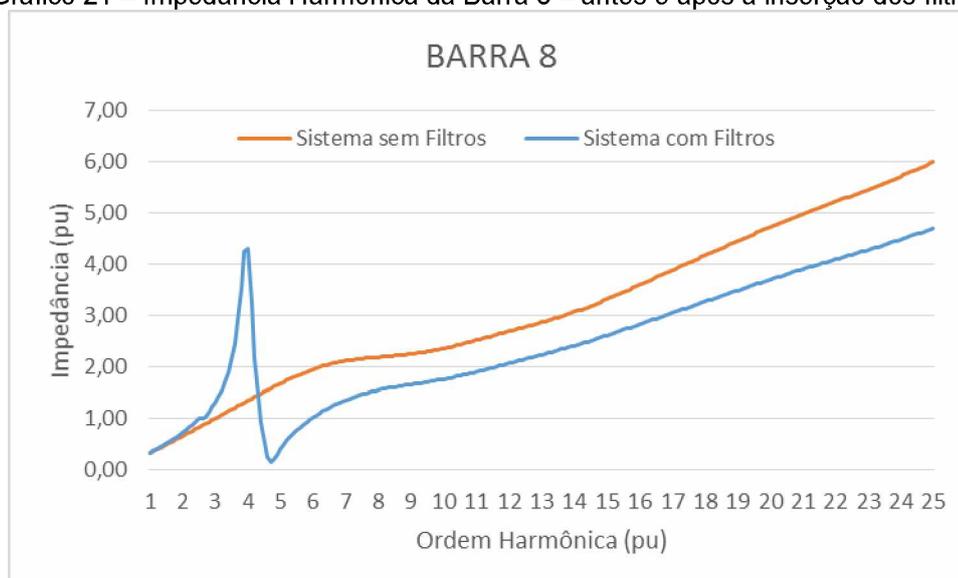
Também foram feitos gráficos comparativos da impedância harmônica das barras 6 e 8, que são as barras que possuem filtros, antes e depois da inserção dos filtros – Gráfico 20 e Gráfico 21.

Gráfico 20 – Impedância Harmônica da Barra 6 – antes e após a inserção dos filtros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 21 – Impedância Harmônica da Barra 8 – antes e após a inserção dos filtros.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser visto no Gráfico 21, a barra 8 possui um ponto de impedância mínima, que indica ressonância série, na ordem 4,7, que é a ordem para a qual o filtro de 5ª harmônica foi projetado, provando o que foi dito na Seção 5.3.2.1, que filtros sintonizados são circuitos ressonantes série. Ainda, pode-se notar que a barra 6 possui dois pontos com impedância mínima, que indica a ocorrência de ressonância série, nas frequências de ordem 2,7 e 4,7 que são as ordens dos filtros de 3ª e 5ª harmônica projetados para esta barra.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi abordado um dos mais frequentes problemas de Qualidade da Energia, as distorções harmônicas. O Capítulo 2 deste trabalho apresentou os fundamentos teóricos do assunto, desde seu conceito, forma de estudo e características de diferentes formas de onda, bem como a forma de cálculo dos índices de distorção harmônica. Então, foi verificada a importância de estudar os fundamentos teóricos para entender o comportamento das distorções harmônicas no sistema, bem como a importância de uma padronização no cálculo dos índices de distorção harmônica.

No Capítulo 3, foram apresentadas algumas das principais cargas geradoras de harmônicos nos sistemas elétricos e os efeitos causados na rede e em alguns equipamentos em função da presença de harmônicos. Ainda, foram citadas as principais normas e recomendações, no cenário nacional e internacional, referentes aos níveis de Distorção Harmônica nos sistemas. Então, identificou-se a importância do estudo deste assunto pelo engenheiro eletricitista, pois é um problema recorrente nos sistemas elétricos, que gera muitas consequências negativas para a rede e que é tratado em diversas normas nacionais e internacionais. Além disso, é possível e provável que ocorra uma futura alteração nas normas brasileiras para que este problema passe a ser monitorado mais a fundo no Brasil.

O Capítulo 4 tratou sobre a ocorrência de ressonâncias série e paralela e seus comportamentos em relação à presença de harmônicos na rede. Por fim, foi apresentado um exemplo prático de ressonância paralela, com análise da impedância harmônica das barras, simulada no programa PCFLO. Assim, foi verificada, na prática, que a injeção de corrente harmônica da mesma ordem da frequência de ressonância, em um sistema com ressonância paralela, pode causar sobretensões, prejudicando capacitores da rede.

No Capítulo 5, foram descritos os métodos existentes de mitigação das distorções harmônicas. Foi dado maior enfoque aos filtros passivos, especialmente aos do tipo sintonizado e, por fim, foi elaborado um passo a passo do dimensionamento deste tipo de filtro harmônico. Concluiu-se, então, a importância do conhecimento das diferentes formas de redução de harmônicos por parte do engenheiro, para que o mesmo saiba apresentar soluções coerentes para o problema.

O Capítulo 6 descreveu o cálculo matricial utilizado por um estudo de penetração harmônica, que é uma forma de analisar o comportamento de um sistema como um todo, quando há injeção de corrente harmônica. Ainda neste capítulo, foi apresentado o *software* PCFLO, que, neste trabalho, foi utilizado para fins de análise do fluxo harmônico e análise da impedância harmônica. Com este capítulo, concluiu-se a importância da utilização de um *software* para os cálculos de penetração harmônica, para que se tenha maior confiabilidade nos cálculos, principalmente quando o sistema a ser analisado é grande e complexo.

O Capítulo 7 apresentou um sistema com injeção de corrente harmônica em alguns pontos, para ser feito o estudo de penetração harmônica, utilizando o *software* PCFLO. A análise foi feita e os resultados obtidos foram comparados com valores recomendados no PRODIST [8]. Com a simulação, foi verificada a importância do estudo de penetração harmônica para o entendimento do que acontece em um sistema com injeção de correntes harmônicas. Pois, apesar de terem sido inseridas apenas em três barras, todo o sistema foi influenciado e resultou em violação dos limites recomendados no PRODIST em seis barras.

Então, ainda no Capítulo 7, foi proposta uma solução para o sistema, visando a diminuição dos índices de distorção harmônica, pela inserção de filtros harmônicos passivos em derivação, projetados conforme passo a passo elaborado no Capítulo 5. Após a inserção dos filtros, o objetivo inicial, que era a diminuição das distorções harmônicas abaixo dos valores recomendados no PRODIST, foi alcançado e, então, foram feitos os cálculos para testes de suportabilidade dos capacitores do filtro, conforme recomendações do IEEE 18-2002 [7]. Verificou-se a importância de se fazer os testes de suportabilidade pois os capacitores dos filtros podem ser prejudicados e o funcionamento do filtro, comprometido.

Por fim, foram elaborados gráficos comparativos com os resultados da análise harmônica, antes e após a inserção dos filtros, nas barras que possuíam valores mais críticos. Além disso, foram elaborados gráficos da impedância harmônica das barras com filtros harmônicos para uma melhor visualização de seu comportamento em relação à frequência antes e após a inserção dos filtros. Isto permitiu verificar a ressonância série nos pontos das frequências para as quais os filtros foram projetados, confirmando o que foi dito no Capítulo 5.

Por fim, foi elaborado um manual para utilização do programa PCFLO, referentes às simulações de penetração harmônica e análise da impedância

harmônica, no Apêndice A deste trabalho. O manual apresenta o *software*, seu funcionamento, descreve os arquivos de entrada e de saída bem como orienta o usuário para a manipulação destes arquivos.

Após o estudo realizado sobre Distorções Harmônicas nesta monografia, é possível perceber o quão vasto e importante é o conhecimento deste tema para a área de Qualidade da Energia Elétrica. Pois, a partir da inserção de harmônicos em um ponto do sistema, uma série de outros problemas podem surgir por todo o sistema, como sobretensão, sobrecarga, aumento de perdas, redução da vida útil e mau funcionamento de equipamentos e, conseqüentemente, insatisfação dos consumidores. Portanto, é essencial que o engenheiro eletricitista tenha conhecimentos sobre distorções harmônicas, saiba analisar um sistema com este problema, bem como apresentar soluções para o mesmo.

REFERÊNCIAS

- [1] DAS, J. C. **Power Systems Harmonics and Passive Filter Designs**. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2015.
- [2] SANKARAN, C. **Power Quality**. CRC Press, 2002.
- [3] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: Unicamp/feec/dsce, 2010.
- [4] GRADY, M. **Understanding Power System Harmonics**. Austin: Universidade do Texas, 2012.
- [5] RESENDE, J. W. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**.
- [6] COSTA, P. M. A. **O Efeito Pelicular ou Efeito Skin**. Disponível em: <http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Artigos_M%C3%A1quinas/Efeito%20pelicular/skin.PDF>. Acesso em: 27 de abril de 2017.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Standard 18 – 2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**, Nova Iorque: IEEE, 2002.
- [8] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, ANEEL, 2010.
- [9] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. **Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica**, ONS, 2016.
- [10] SANTOS, F. M. F. **Qualidade da Energia – Comparação das Normas IEC 61000-3-2 e IEEE519**. Rio de Janeiro, 2007.
- [11] POMILIO, J. A, **Normas Relativas ao Fator de Potência e Distorção Harmônica**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/harmo.html>>. Acesso em: 5 de maio de 2017.

- [12] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Standard 519 – 1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, Nova Iorque: IEEE, 1992.
- [13] RESENDE, J. W. **Análise Harmônica de Redes**.
- [14] IEEE 1531 “**IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**”, IEEE Std 1531 – 2003.
- [15] D. E. Steeper; R. P. Stratford: “**Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters**”, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 12, no. 3, 1976, pp.232-254.
- [16] R.L. Almonte; A.W.Ashley, (1995) “**Harmonics at the utility industrial interface: a real world example**”, IEEE Trans. on IA, Vol. 31, No. 6, Nov. Dec., pp. 1419-1426.
- [17] POMILIO, J. A, **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/CAP7.pdf>>. Acesso em: 21 de junho de 2017.
- [18] NASCIMENTO, R. P. **Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [19] GRADY, M. **PCFLO User Manual**. Austin: Universidade do Texas, 2011.

APÊNDICE A – Instruções para Utilização do Programa PCFLO

A.1 Apresentação do Programa

O Programa PCFLO é um *software* para simulação de Fluxo de Carga, Curto-Circuito, Fluxo Harmônico (ou Penetração Harmônica) e Impedância Harmônica. O programa utiliza arquivos de entrada e saída do tipo CSV (“*comma-separated value*” ou valores separados por vírgula). Neste tipo de arquivo, os dados devem ser colocados de forma ordenada entre as vírgulas, uma vez que cada campo do arquivo especifica um parâmetro diferente.

Este tipo de arquivo é facilmente manipulado através do Microsoft Excel, o que colabora para que a falta de interface para inserção dos dados não seja algo desvantajoso para o uso deste programa. Além disso, no diretório raiz do programa existem arquivos com cabeçalhos indicando o parâmetro necessário em cada campo, facilitando a entrada de dados.

Este documento se destina à apresentação das instruções de utilização do Programa para Penetração Harmônica e Análise da Impedância Harmônica, desde a preparação dos arquivos de entrada com os dados do sistema, até a manipulação dos arquivos de saída, com os resultados obtidos na simulação.

A.2 Visão Geral do Funcionamento

A.2.1 Arquivos de Entrada

São necessários três arquivos com dados do sistema para que o programa faça o estudo. Estes arquivos são:

- BDAT – dados das barras do sistema e das cargas não-lineares conectadas a elas;
- LDAT – dados das linhas do sistema e de elementos série como transformadores
- SPECTRA – dados das fontes de corrente harmônica – o programa já possui alguns tipos de cargas não-lineares pré-cadastradas, mas o usuário tem também a opção de fornecer os dados das correntes harmônicas injetadas pela carga;

A.2.2 Procedimentos de Cálculo do Programa

O programa faz todos os cálculos em pu, com base de potência de 100 MVA, e sempre começa com um fluxo de carga. Isso porque o fluxo de carga é uma ferramenta para depuração, ou seja, se o fluxo de carga não rodar, os dados de entrada são questionáveis. Depois de rodado, o fluxo de carga estabelece as magnitudes e ângulos de fase de tensão fundamental por todo o sistema. Considera-se a barra de referência como sem nenhuma distorção e seu ângulo de fase da tensão é sempre zero, ou seja, é a referência para todas as tensões e correntes fundamentais e harmônicas do sistema.

As harmônicas são calculadas em relação à fundamental, uma por uma, usando o princípio de injeção de corrente no domínio da frequência, uma harmônica por vez. Para cada ordem harmônica h , é utilizado o seguinte procedimento:

- Construção da matriz admitância, usando as redes apropriadas de sequência positiva, negativa e zero para a ordem h ;
- A injeção de corrente de ordem h é determinada usando o espectro de frequências e a potência de cada carga não-linear;
- Todas as correntes harmônicas de ordem h de todas as cargas não-lineares são injetadas simultaneamente na rede;
- As tensões nas barras e as correntes nos ramos são determinadas para a ordem h por análise fasorial padrão;

Como pode ser observado, os procedimentos de cálculo do programa seguem o descrito no Capítulo 5.

A.2.3 Arquivos de Saída

Os resultados obtidos na simulação de Penetração Harmônica são gravados nos seguintes arquivos de saída:

- VSOLN – são fornecidas as tensões harmônicas (em módulo, em pu, e ângulo) nas barras do sistema. Também são fornecidas as correntes harmônicas (em módulo, em pu, e ângulo) injetadas nas barras;
- THDV – são fornecidas as distorções harmônicas totais de tensão nas barras do sistema;

- ISOLN – são fornecidas as correntes harmônicas (em módulo, em pu, e ângulo) circulantes nos ramos do sistema;
- THDI – são fornecidas as distorções harmônicas totais de corrente nos ramos do sistema;

Ainda, os resultados obtidos na simulação de Impedância Harmônica são gravados nos arquivos:

- ZBUS0, ZBUS1 e ZBUS2 – são fornecidos, para as barras definidas pelo usuário, a magnitude, em pu, e ângulo de fase da impedância da barra para cada ordem harmônica (de 1 até a máxima harmônica de análise, definida pelo usuário, com intervalo de 0,1 para os resultados). Os arquivos dizem respeito aos resultados para sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

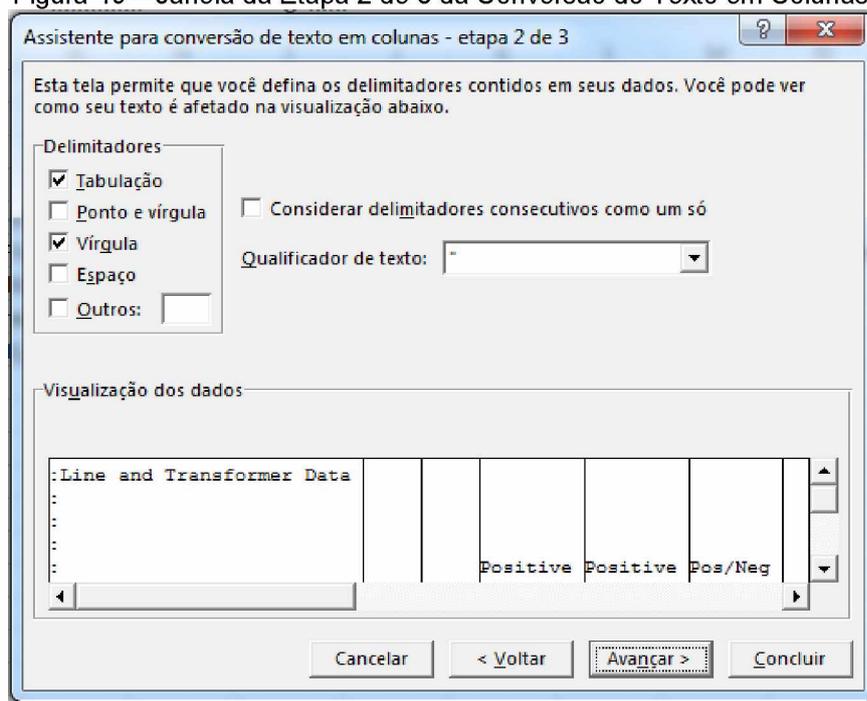
Além destes arquivos com os resultados, são gerados outros arquivos de saída, são eles:

- ASOLN – contém um resumo do fluxo de carga, com informações da potência total gerada, consumida e perdida;
- EXLOG – apresenta um resumo das linhas de código;
- OUT1, OUT2 e OUT3 – mostram os dados lidos nos arquivos de entrada, bem como mensagens de erro;
- OUT4 – Resultado do fluxo de carga para cada barra – contém informações de módulo e ângulo da tensão, potência ativa e reativa consumida e gerada, compensação shunt e informações do transformador;
- OUT5 – Resumo do fluxo de carga;

Com os resultados disponíveis nos arquivos VSOLN, ISOLN, THDV e TDHI, é possível organizar facilmente tabelas e gráficos utilizando o Excel, conforme a necessidade de análise do usuário. Com o arquivo ZBUS1, é possível confeccionar gráficos da variação da impedância das barras com a frequência, para visualização do comportamento da barra. Este recurso é especialmente útil para a identificação de ressonâncias no sistema.

Deve-se selecionar a opção “Delimitado” e, em seguida, “Avançar”. A janela da Figura 49 aparecerá. Nela, deve-se selecionar “Vírgula” para que cada campo separado por vírgula seja separado por colunas.

Figura 49 – Janela da Etapa 2 de 3 da Conversão do Texto em Colunas.



Em seguida, clica-se em “Concluir” e cada campo separado por vírgulas se torna uma coluna, tornando o arquivo mais adequado para a inserção dos dados, como pode ser visto na Figura 50.

Figura 50 – Visualização do arquivo LDAT_Header.csv após Conversão do Texto para Colunas.

:Line and Transformer Data												
:												
:												
:												
:			Positive	Positive	Pos/Neg							
:			Sequence	Sequence	Sequence		Mínimum	Maximum	Tap	Fixed	Phase	
:	From	To	Circuit	R	X	Charging	Rating	Tap	Tap	Step Size	Tap	Shift
:	Bus	Bus	Number	(pu)	(pu)	(%)	(%)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(Degrees)
:	(I)	(I)	(I)	(F)	(F)	(F)	(F)	(F)	(F)	(F)	(F)	(F)

Estes procedimentos devem ser feitos toda vez que se abrir um novo arquivo de entrada tipo csv para ser preenchido. Agora, basta preencher os arquivos .csv com os dados do sistema. É importante ressaltar que as casas decimais devem ser separadas por “vírgula” durante o preenchimento desses arquivos.

Os arquivos de entrada, com seus respectivos dados solicitados são descritos a seguir.

A.3.2 BDAT – Dados das Barras e Elementos Shunt

Os dados solicitados neste arquivo estão descritos abaixo e devem ser inseridos nessa ordem.

- Número da barra – número inteiro;
- Nome da barra – até 12 caracteres;
- Tipo da barra – Barra de referência ou swing:1, barra PV: 2, barra PQ: 3;
- Geração de potência ativa de carga linear – porcentagem;
- Geração de potência reativa de carga linear – porcentagem;
- Consumo de potência ativa de carga linear – porcentagem;
- Consumo de potencia reativa de carga linear – porcentagem;
- Tensão desejada na barra – pu – este campo deve ser preenchido apenas para as barras do tipo referência e PV;
- Potência reativa do elemento shunt – porcentagem;
- Máxima geração reativa – porcentagem – este campo deve ser preenchido apenas para as barras do tipo referência e PV;
- Mínima geração reativa – porcentagem – este campo deve ser preenchido apenas para as barras do tipo referência e PV;
- Área de controle da barra – número inteiro;
- Barra controlada – número inteiro;
- Tipo de conexão do elemento reativo shunt – 0 ou 1 para estrela aterrada, outro número inteiro para estrela ou delta;
- Resistência de sequência positiva da máquina ligada à barra – pu;
- Reatância subtransitória de sequência positiva da máquina ligada à barra – pu;
- Resistência de sequência negativa da máquina ligada à barra – pu;
- Reatância subtransitória de sequência negativa da máquina ligada à barra – pu;
- Resistência de sequência zero da máquina ligada à barra – pu;

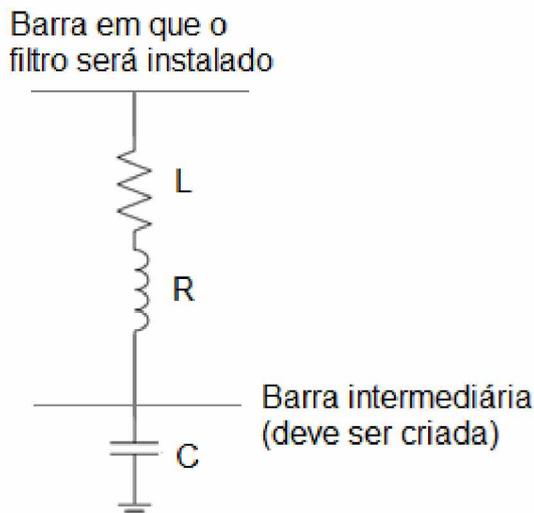
- Reatância subtransitória de sequencia zero da máquina ligada à barra – pu;
- Tipo de ligação da máquina ligada à barra – 0 ou 1 para estrela aterrada, outro número inteiro para estrela ou delta;
- Resistência de aterramento da máquina ligada à barra – pu;
- Reatância de aterramento da máquina ligada à barra – pu;
- Geração de potência ativa do elemento não-linear ligado à barra – porcentagem;
- Consumo de potência ativa do elemento não-linear ligado à barra – porcentagem;
- Fator de potência de deslocamento do elemento não linear ligado à barra – pu;
- Tipo de carga não linear – número inteiro de 1 a 33, sendo de 1 a 13 cargas pré-configuradas no programa conforme Tabela 22 e de 14 a 33, tipos configurados pelo usuário através do arquivo SPECTRA;
- Deslocamento de fase do elemento não-linear em relação ao sistema – graus;
- Tipo de conexão do elemento não-linear – 0 ou 1 para estrela aterrada, outro número inteiro para estrela ou delta;

Tabela 22 – Tipos de Cargas Não-Lineares Padronizadas no PCFLO.

Número da Carga Não-Linear	Tipo da Carga Não-Linear
1	Fonte de Corrente de 2 pulsos
2	Fonte de Tensão de 2 pulsos
3	Fonte de Corrente de 6 pulsos
4	Fonte de Tensão de 6 pulsos
5	Fonte de Corrente de 12 pulsos
6	Fonte de Tensão de 12 pulsos
7	Fonte de Corrente de 18 pulsos
8	Fonte de Tensão de 18 pulsos
9	Fonte de Corrente de 6 pulsos modificada: Igual à de tipo 3, mas com as harmônicas de ordem 11 e 13 multiplicadas por 0.75, as de ordem 17 e 19 multiplicadas por 0.5 e todas as de ordem superior, multiplicadas por 0.25.
10	Dispositivo monofásico: estrela aterrada – estrela aterrada
11	Dispositivo monofásico: delta – estrela aterrada
12	Lâmpada fluorescente com reator magnético: estrela aterrada – estrela aterrada
13	Lâmpada fluorescente com reator magnético: delta – estrela aterrada

Para inserção de filtros harmônicos no PCFLO, deve ser criada uma barra intermediária no filtro, como na Figura 51.

Figura 51 – Filtro harmônico no PCFLO.



A.3.3 LDAT – Dados das Linhas e Elementos Série

Os dados solicitados neste arquivo estão descritos abaixo e devem ser inseridos nessa ordem.

- 1) Número da barra de origem – número inteiro;
- 2) Número da barra de destino – número inteiro;
- 3) Número do circuito – número inteiro;
- 4) Resistência de sequência positiva da impedância série da linha – pu;
- 5) Reatância de sequência positiva da impedância série da linha – pu;
- 6) Susceptância de sequência positiva e negativa – porcentagem;
- 7) Capacidade de potência do elemento – porcentagem – este dado pode ser omitido;
- 8) TAP mínimo ou ângulo de defasamento mínimo do transformador – pu ou graus – o ângulo deve ser da barra de origem em relação à barra de destino;
- 9) TAP máximo ou ângulo de defasamento máximo do transformador – pu ou graus – o ângulo deve ser da barra de origem em relação à barra de destino;
- 10) Passo do TAP ou ângulo definido do transformador – pu ou graus;
- 11) TAP do transformador definido – pu;

- 12) Ângulo de defasamento do transformador definido – graus;
- 13) Número da barra controlada – número inteiro;
- 14) Lado da barra controlada – 1 para barra controlada do lado da barra de origem do transformador, 2, caso contrário;
- 15) Tensão desejada ou fluxo de potência ativa desejado – pu ou porcentagem;
- 16) Resistência de sequência zero – pu;
- 17) Reatância de sequência zero – pu;
- 18) Susceptância de sequência zero – pu;
- 19) Tipo de conexão do transformador – 0 a 9 de acordo com Tabela 23;
- 20) Resistência de aterramento – pu;
- 21) Reatância de aterramento – pu;

Tabela 23 – Tipos de Conexão para Transformadores e Elementos Shunt.

Elemento	Número	Tipo de Conexão
Transformador	0 ou 1	Yaterrada – Yaterrada
	2	Yaterrada – Y
	3	Y – Yaterrada
	4	Y – Y
	5	Δ – Δ
	6	Yaterrada – Δ
	7	Y – Δ
	8	Δ – Yaterrada
	9	Δ – Y
Elementos shunt	0 ou 1	Yaterrada
	Outro inteiro	Y ou Δ

A.3.4 SPECTRA – Dados das Fontes Harmônicas

Neste arquivo, o usuário pode configurar fontes harmônicas diferentes das cargas não-lineares já padronizadas no programa, presentes na Tabela 22. Os dados solicitados neste arquivo estão descritos abaixo e devem ser inseridos nessa ordem.

- 1) Tipo da Série – sin para série de senos e cos para série de cossenos – Não é possível mesclar;
- 2) Tipo da Carga não-linear – número inteiro de 14 a 33 – deve corresponder ao número definido no campo 27 do arquivo BDAT;
- 3) Ordem harmônica – número inteiro;

- 4) Magnitude da corrente harmônica – pu (em relação à fundamental);
- 5) Ângulo de fase da corrente harmônica – graus (em relação à fundamental);

A.3.5 Preparação dos arquivos preenchidos para inserção no PCFLO

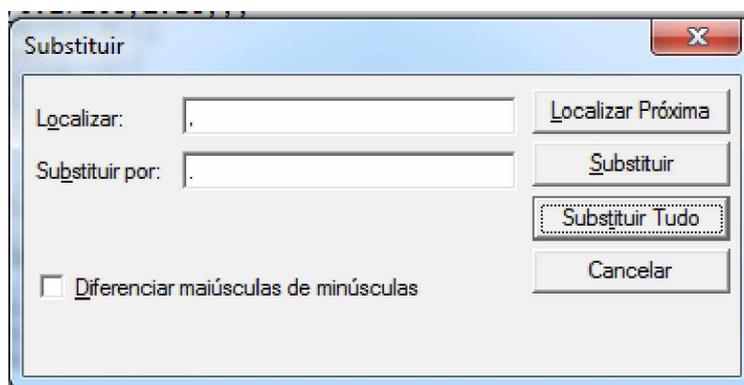
Após o preenchimento correto dos arquivos BDAT_Header, LDAT_Header e SPECTRA_Header, as próximas instruções devem ser cuidadosamente seguidas para que o programa PCFLO faça a leitura correta dos dados do sistema.

Primeiramente, os 3 arquivos devem ser salvos com o mesmo nome e com tipo csv no diretório raiz do programa PCFLO pois esta é a forma que o mesmo identificará que eles dizem respeito a um mesmo sistema. Por exemplo, se o usuário desejar colocar o nome “sistema” à sua simulação, portanto, os arquivos devem ser salvos como BDAT_sistema.csv, LDAT_sistema.csv e SPECTRA_sistema.csv.

Feito isso, basta abrir cada um dos arquivos no WordPad ou Bloco de Notas. Os arquivos estarão com a “vírgula” como separador de casas decimais e o “ponto-e-vírgula”, como separador de campos. Porém, o programa PCFLO reconhece apenas arquivos com campos separados por “vírgulas” e casas decimais separadas por “ponto”. Portanto, para tornar os arquivos compatíveis com o PCFLO, o procedimento abaixo deve ser seguido.

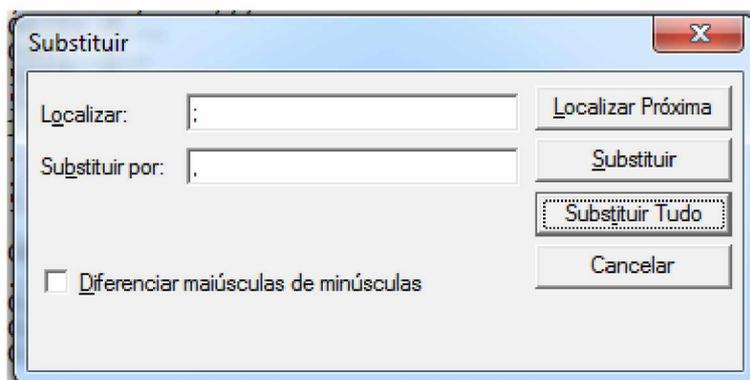
- 1) No Bloco de Notas ou WordPad, deve-se utilizar o comando CTRL+H e substituir “vírgula” por “ponto”, como demonstrado na Figura 52;

Figura 52 – Substituição de “vírgula” por “ponto” no Bloco de Notas.



- 2) Em seguida, substituir “ponto e vírgula” por “vírgula”, como demonstrado na Figura 53;

Figura 53 – Substituição de “ponto-e-vírgula” por “vírgula” no Bloco de Notas.

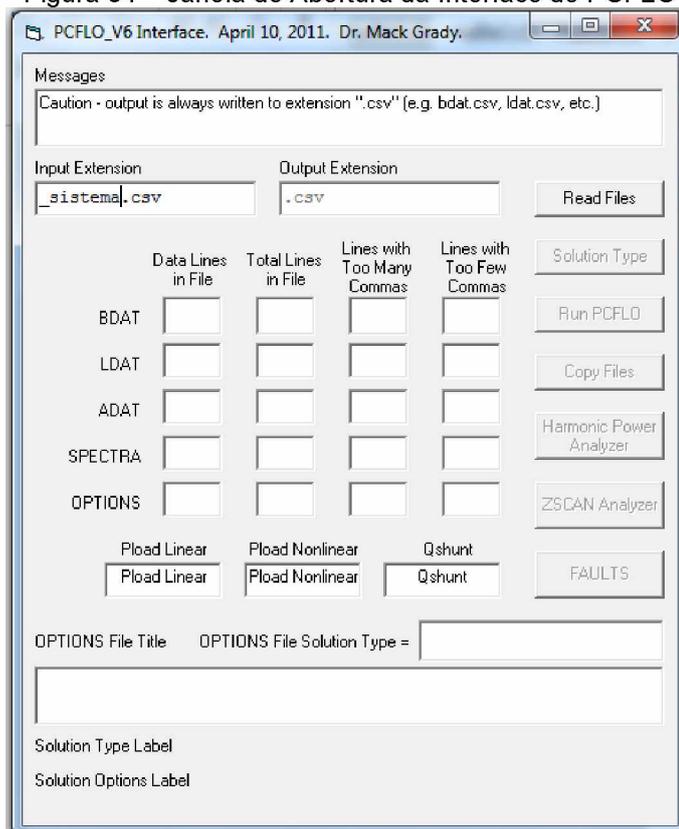


Assim, as casas decimais agora estarão separadas por “ponto” e os campos, separados por “vírgula”, como requerido pelo programa PCFLO. Este procedimento deve ser feito nos três arquivos (LDAT, BDAT e SPECTRA). Em seguida, basta salvar as alterações e os arquivos estão prontos para serem inseridos no programa.

A.4 Utilização da Interface do PCFLO

Para começar a utilização do programa propriamente dito, basta abrir a interface do PCFLO e a janela da Figura 54 aparecerá.

Figura 54 – Janela de Abertura da Interface do PCFLO



O campo “Input Extension” deve ser preenchido com a extensão dos arquivos de entrada. Por exemplo, para os arquivos BDAT_sistema.csv, LDAT_sistema.csv e SPECTRA_sistema, a extensão é “_sistema.csv” e o preenchimento é feito como na figura.

Feito isso, basta clicar em “Read Files” e o programa lerá os arquivos. Em seguida, o programa fornece um breve resumo dos dados encontrados nos arquivos e as potências ativa e reativa das cargas do sistema. Além disso, o botão “Solution Type” se encontrará ativo.

O botão “Solution Type” deve ser clicado e a janela da Figura 55, com as opções de solução do programa, será aberta.

Figura 55 – Janela com as Opções de Solução do Programa.

The dialog box 'Solution Options' contains the following settings:

Bus Ordering Method	G-S Start	PQ Mismatch for G-S Start	Accel. Factor for G-S Start	Voltage Update Cap for G-S Start	PQ Mismatch Tolerance	Highest Harmonic	Harmonic Load Model for PQ Loads, 0-1-2-3-4	Global Linear Motor Load Modeling Fraction
2	T	0.5	1.2	0.005	5.0e-6	25	1	0.667

Global Resistance Doubling Harmonic: 15

Nela, deve-se escolher o tipo de estudo a ser feito pelo programa (Fluxo de Carga, Curto Circuito, Penetração Harmônica ou Estudo da Impedância Harmônica) bem como definir os parâmetros para a solução.

A.4.1 Estudo de Penetração Harmônica

Para o estudo de penetração harmônica, deve ser selecionado “Full Harmonic Solution” e os campos devem ser preenchidos como na Figura 55. O usuário pode definir até qual ordem harmônica o programa deve analisar no campo “Highest Harmonic”. Após clicar no botão “Close”, a janela da Figura 54 aparecerá novamente, porém, com o botão “Run PCFLO” ativo.

O botão “Run PCFLO” deve ser clicado para que o programa comece a rotina de cálculos. Uma janela de “Prompt de comando” será aberta e nela aparecerá mensagens de erro e os cálculos feitos. Se não houver nenhum erro, a janela da Figura 54 aparecerá novamente, agora com o botão “Copy Files” ativo. O botão “Copy Files” deve ser clicado para que os resultados obtidos nos cálculos de penetração harmônica sejam gravados nos arquivos de saída e possam ser visualizados pelo usuário.

Feito isso, no diretório raiz do programa deverão se encontrar todos os arquivos de saída mencionados na seção A.2.3. Eles estarão salvos com a mesma extensão dada aos arquivos de entrada. Isto pode ser visto na Figura 56.

Figura 56 – Diretório do Programa com os Arquivos de Saída .

Nome	Tipo
thdi_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
thdv_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
border_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
zbus2_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
zbus1_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
zbus0_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
options_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
SPECTRA_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
out5_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
out4_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
out3_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
out2_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
out1_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
vsoln_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
isoln_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
asoln_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...
exlog_Sistema	Arquivo de Valores Separados por Vírgulas ...

Agora, basta seguir os procedimentos da seção A.5 para utilizar os resultados obtidos na simulação.

A.4.2 Análise da Impedância Harmônica

Para o estudo de impedância harmônica, deve ser selecionado “Harmonic Impedance Scan” na janela da Figura 55 e os campos devem ser preenchidos como na Figura 57.

Figura 57 –Janela com as Opções de Solução do Programa – “Harmonic Impedance Scan”.

The screenshot shows the 'Solution Options' dialog box with the following settings:

Bus Ordering Method	G-S Start	PQ Mismatch for G-S Start	Accel. Factor for G-S Start	Voltage Update Cap for G-S Start	PQ Mismatch Tolerance	Lowest Harmonic Integer	Highest Harmonic Integer	Number of Steps per Harmonic
2	T	0.5	1.2	0.005	5.0e-6	1	25	10
Limit ZSCAN to Diagonal Elements	Scan This Bus	and Scan This Bus	and Scan This Bus	and Scan This Bus	and Scan This Bus	Harmonic Load Model for PQ Loads, 0-1-2-3-4	Global Linear Motor Load Modeling Fraction	Global Resistance Doubling Harmonic
T	1	2				1	0.667	15

O usuário pode definir até qual ordem harmônica o programa deve analisar no campo “Highest Harmonic” e deve informar de uma até cinco barras para que o programa faça a análise da impedância, nos campos “Scan This Bus” e “and Scan This Bus”.

Após clicar no botão “Close”, assim como para a simulação da penetração harmônica descrita na seção anterior, a janela da Figura 54 aparecerá novamente, porém, com o botão “Run PCFLO” ativo. O botão “Run PCFLO” deve ser clicado para que o programa comece a rotina de cálculos. Uma janela de “Prompt de comando” será aberta e nela aparecerá mensagens de erro e os cálculos feitos. Se não houver nenhum erro, a janela da Figura 54 aparecerá novamente, agora com o

botão “Copy Files” ativo. O botão “Copy Files” deve ser clicado para que os resultados obtidos na análise da impedância harmônica sejam gravados nos arquivos de saída e possam ser visualizados pelo usuário.

Feito isso, no diretório raiz do programa deverão se encontrar todos os arquivos de saída mencionados na seção A.2.3. Eles estarão salvos com a mesma extensão dada aos arquivos de entrada

Agora, basta seguir os procedimentos da seção A.5 para utilizar os resultados obtidos na simulação.

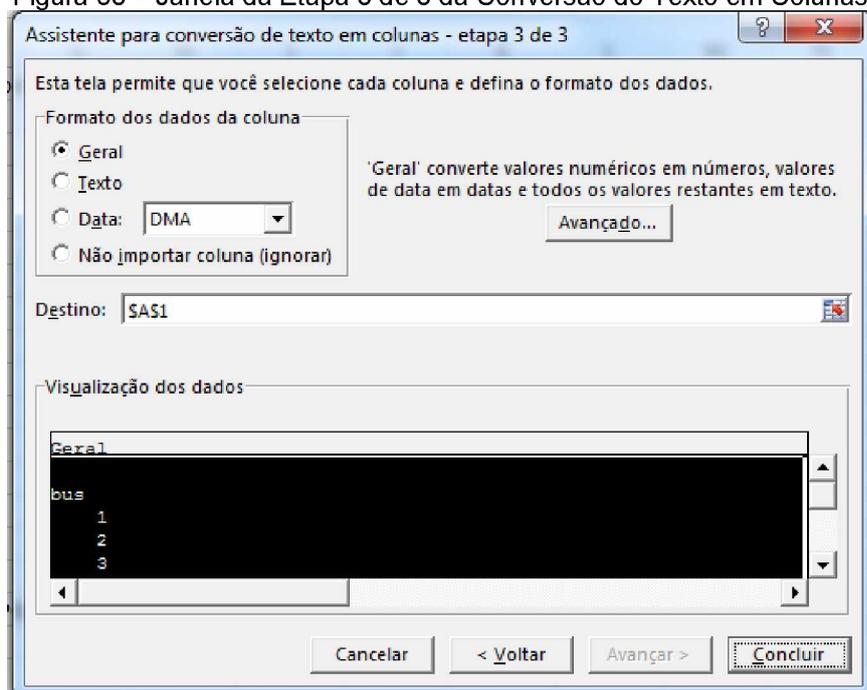
A.5 Análise dos Resultados da Simulação

A.5.1 Preparação dos Arquivos de Saída para o Uso

Nesta seção, deseja-se manipular os arquivos de saída para utilização dos resultados do estudo feito. Estes arquivos de saída são do tipo csv e salvos com a mesma extensão dos arquivos de entrada. A primeira coisa a ser feita ao abrir o arquivo .csv com o Microsoft Excel é converter o texto do arquivo para colunas. Para isso, o processo agora é um pouco diferente do descrito no início da seção A.3.1.

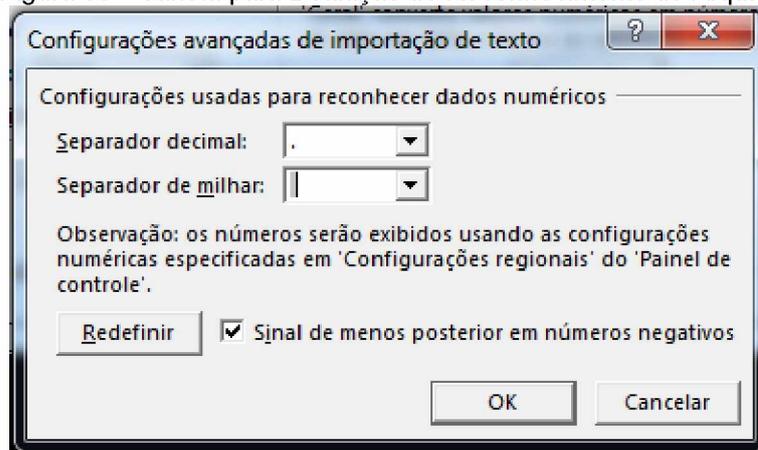
Inicialmente, deve ser seguido o mesmo procedimento descrito até a Etapa 2 de 3, ou Figura 49. A partir daí, ao invés de clicar em “Concluir”, deve-se clicar em “Avançar” e a próxima janela será como a Figura 58.

Figura 58 – Janela da Etapa 3 de 3 da Conversão do Texto em Colunas.



Em seguida, clica-se em “Avançado” para definir como deve ser feito o reconhecimento do arquivo, então a janela da Figura 59 aparecerá.

Figura 59 – Janela para Definição de Reconhecimento do Arquivo



Deve ser informado ao Excel que o separador de decimais deste arquivo é “ponto” e o separador de milhar é “espaço”, como na figura, para que ele importe os dados corretamente. Feito isso, basta clicar em “Ok” e depois, em “Concluir” na janela da Figura 58. Este procedimento deve ser feito em todos os arquivos de saída, que se desejar utilizar. Feito isso, os arquivos estarão em formato de tabela e prontos para manuseio do usuário.

Os arquivos de saída, com os respectivos resultados da simulação, são descritos a seguir.

A.5.2 VSOLN – Tensões Harmônicas nas Barras e Correntes Harmônicas Injetadas

Os resultados fornecidos neste arquivo estão descritos abaixo.

- 1) Ordem harmônica – pu;
- 2) Número da barra;
- 3) Magnitude da tensão – pu;
- 4) Magnitude da injeção de corrente – pu;
- 5) Ângulo de fase da injeção de corrente – graus;
- 6) Nome da barra;

A.5.3 THDV – Distorção Total de Tensão nas Barras

Os resultados fornecidos neste arquivo dizem respeito exclusivamente ao processamento de Análise Harmônica e estão descritos abaixo.

- 1) Número da barra;
- 2) Nome da barra;
- 3) Tensão fundamental – pu;
- 4) Distorção total de tensão – %;

Ainda, este arquivo informa qual a barra com maior distorção harmônica de tensão.

A.5.4 ISOLN – Correntes Harmônicas nas Linhas

Os resultados fornecidos neste arquivo estão descritos abaixo.

- 1) Ordem harmônica – pu;
- 2) Número da barra de origem;
- 3) Número da barra de destino;
- 4) Número do circuito;
- 5) Magnitude da corrente harmônica – pu;
- 6) Ângulo de fase da corrente harmônica – graus;
- 7) Nome da barra de origem;
- 8) Nome da barra de destino;

A.5.5 THDI – Distorção Total de Corrente nas Linhas

Os resultados fornecidos neste arquivo dizem respeito exclusivamente ao processamento de Análise Harmônica e estão descritos abaixo.

- 1) Número da barra de origem;
- 2) Nome da barra de origem;
- 3) Número da barra de destino;
- 4) Nome da barra de destino;
- 5) Número do circuito;
- 6) Corrente Fundamental – pu;
- 7) Distorção Total de Corrente – %;

A.5.6 ZBUS1 – Impedância Harmônica das Barras

Os resultados fornecidos neste arquivo dizem respeito exclusivamente ao processamento de Impedância Harmônica e estão descritos abaixo.

- 1) Ordem harmônica – pu;
- 2) Barra de origem;
- 3) Barra de destino;
- 4) Magnitude da impedância – pu;
- 5) Ângulo de fase da impedância – graus;
- 6) Nome da barra de origem;
- 7) Nome da barra de destino;

A barra de origem e de destino, neste arquivo, é sempre a mesma. Para ver a curva da característica da impedância da barra de acordo com a frequência, basta criar um gráfico de linha com os valores da coluna 1 e 4. Esta curva permite identificar pontos de ressonância no sistema.