

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL

DOUGLAS ÂNGELO TEIXEIRA

Orientador:

PORFÍRIO CABALEIRO CORTIZO
BENJAMIM RODRIGUES DE MENEZES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

PPGEE – UFMG
Novembro de 2009

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer a Gerdau Usiba pela oportunidade de realização deste trabalho.

Agradeço a Deus por mais esta conquista.

Ao Professor Dr. Benjamim Rodrigues de Menezes pela paciência e colaboração neste trabalho, pela oportunidade de iniciar a pesquisa na área de Eletrônica de Potência e por sua orientação segura e objetiva.

Ao Professor Dr. Porfírio Cabaleiro Cortizo que por meio de sua competência e valiosas contribuições me ajudou a adquirir os conhecimentos necessários sobre Eletrônica de Potência.

Aos meus pais e meu irmão pelo investimento em mim realizado e os anos de carinho e dedicação que foram fundamentais para que eu me tornasse quem sou hoje.

Aos meus companheiros do Laboratório de Sistemas Elétricos Industriais pelo apoio e atenção.

À UFMG pela oportunidade de me tornar Mestre em Engenharia Elétrica.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 : Configuração de retificador de 6 pulsos.
- Figura 2.2 : Motor c.c. acionado por um retificador de 6 pulsos totalmente controlado
- Figura 2.3 : Ponte retificadora mista
- Figura 2.4 : Inversor de frequência
- Figura 2.5 : a) curva BxH média do ferro do transformador, b) curva de magnetização.
- Figura 2.6 : Estrutura de um forno a arco elétrico.
- Figura 2.7 : Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de corrente
- Figura 2.8 : Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de tensão
- Figura 2.9 : Diminuição da vida útil x sobretensão permanente em um capacitor
- Figura 3.1 : Conexão e circuito típico de filtro série
- Figura 3.2 : Conexão e circuito típico de filtro shunt
- Figura 3.3 : Filtro shunt sintonizado simples
- Figura 3.4 : Filtro shunt amortecido de 2^a ordem.
- Figura 3.5 : Circuito para computação da Distorção Harmônica de Tensão
- Figura 3.6 : a) Dois filtros sintonizados simples, b) Um filtro sintonizado duplo.
- Figura 3.7 : Filtros amortecidos passa-alta: a) de 1^a ordem, b) de 2^a ordem, c) de 3^a ordem, d) Tipo C.
- Figura 3.8 : Configuração típica de um filtro c.a.
- Figura 3.9 : Ramo de um filtro c.a. ligado em estrela.
- Figura 3.10 : Sistema de proteção de filtros.
- Figura 3.11 : Custo de um filtro Sintonizado.
- Figura 4.1 : Diagrama unifilar geral simplificado
- Figura 4.2 : Perfil das Tensões eficazes fase-neutro ponto M1.
- Figura 4.3 : Perfil das distorções harmônica totais das tensões fase-neutro ponto M1.
- Figura 4.4 : Espectro de frequência dos valores P95% da tensão ponto M1.
- Figura 4.5 : Perfil das correntes de linha eficaz do ponto de medição M1.
- Figura 4.6 : Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M1.
- Figura 4.7 : Espectro de frequência dos valores P95% da corrente ponto M1.
- Figura 4.8 : Perfil das tensões valores eficazes ponto M2.

Figura 4.9 : Perfil das distorções harmônicas totais das tensões ponto M2.

Figura 4.10 : Espectro de frequência dos valores P95% da tensão ponto M2.

Figura 4.11 : Perfil da corrente nas fases valores Eficazes ponto M2.

Figura 4.12 : Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha ponto M2.

Figura 4.13 : Espectro de frequência dos valores P95% da corrente ponto M2.

Figura 4.14 : Perfil das tensões fase-neutro valores eficazes ponto M3.

Figura 4.15 : Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro ponto M3.

Figura 4.16 : Espectro de frequência dos valores P95% da tensão ponto M3.

Figura 4.17 : Perfil da corrente nas fases valores eficazes ponto M3.

Figura 4.18 : Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha ponto M3.

Figura 4.19 : Espectro de frequência dos valores P95% da corrente ponto M3.

Figura 4.20 : Perfil das tensões fase-neutro valores eficazes ponto M4.

Figura 4.21 : Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro ponto M4.

Figura 4.22 : Espectro de frequência dos valores P95% da tensão ponto M4.

Figura 4.23 : Perfil da corrente nas fases valores Eficazes ponto M4.

Figura 4.24 : Perfil da distorção harmônica total da correntes de linha ponto M4.

Figura 4.25 : Espectro de frequência dos valores P95% da corrente ponto M4.

Figura 4.26 : Espectro de frequência dos valores Eficazes de Tensão do ponto M5.

Figura 4.27 : Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro do ponto M5.

Figura 4.28 : Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M5.

Figura 4.29 : Perfil da corrente de linha para o ponto M5.

Figura 4.30 : Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M5.

Figura 4.31 : Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M5.

Figura 4.32 : Perfil das tensões fase-neutro valores eficazes do ponto M6.

Figura 4.33 : Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro do ponto M6.

Figura 4.34 : Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M6.

Figura 4.35 : Perfil da corrente nas fases – Valores Eficazes do ponto M6.

Figura 4.36 : Perfil da distorção harmônica total da corrente do ponto M6.

Figura 4.37 : Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M6.

Figura 5.1.a : Sistema Elétrico: Alimentação da CHESF, Forno Panela e Forno EBT .

Figura 5.1.b : Modelo do Sistema Elétrico: Laminação, Usina e Redução Direta.

Figura 5.2 : Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico

Figura 5.3: Resposta em frequência do sistema com a inserção do banco de capacitores.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 : Características harmônicas dos retificadores de 6 pulsos.
- Tabela 2.2 : Características harmônicas dos retificadores de 12 pulsos.
- Tabela 2.3 : Características harmônicas dos retificadores de 12 pulsos.
- Tabela 2.4 : Amplitudes relativas de tensão, corrente e fluxo harmônicos/fase do motor [16].
- Tabela 2.5 : Correntes harmônicas típicas geradas por um motor de indução de rotor bobinado [16]
- Tabela 2.6 : Análise de Fourier para correntes de forno [16]
- Tabela 2.7 : Limites de distorção de tensão [12]
- Tabela 2.8 : Limites de distorção de corrente (DTD) em relação à corrente fundamental
- Tabela 2.9 : Limites de harmônicos individuais em sistema públicos de baixa tensão
- Tabela 2.10 : Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe A
- Tabela 2.11 : Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe C
- Tabela 2.12 : Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe D
- Tabela 2.13 : Limites de correntes harmônicas para equipamentos com correntes entre 16 e 75 A
- Tabela 2.14 : Limites de distorções harmônicas recomendadas pela norma IEC 61000-3-6.
- Tabela 2.15 : Limites globais de harmônicos em relação à tensão fundamental [17]
- Tabela 2.16 : Limites harmônicos de tensão por consumidor em relação à tensão fundamental [10]
- Tabela 2.17 : Valores permitidos para as variações de tensão nominal igual ou superior a 230kV.
- Tabela 2.18 : Valores permitidos para as variações de tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV.
- Tabela 2.19 : Valores permitidos para as variações de tensão nominal igual ou inferior a 1kV.
- Tabela 3.1 : Efeito da limitação do ângulo da impedância da rede sobre o Q ótimo e sobre a tensão harmônica máxima V_h .
- Tabela 4.1 : Transformadores do Esquema Lógico
- Tabela 4.2 : Valores estatísticos das Tensões Eficazes do ponto M1
- Tabela 4.3 : Valores estatísticos das distorções totais de tensão ponto M1.

Tabela 4.4 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M1.

Tabela 4.5 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficaz do ponto M1.

Tabela 4.6 : Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M1

Tabela 4.7 :Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente no ponto M1.

Tabela 4.8 : Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M2

Tabela 4.9 : Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M2

Tabela 4.10 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M2

Tabela 4.11 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficazes do ponto M2

Tabela 4.12 : Valores estatísticos da distorção total da corrente do ponto M2.

Tabela 4.13 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M2

Tabela 4.14 : Valores estatísticos das tensões Eficazes do ponto M3

Tabela 4.15 : Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M3

Tabela 4.16 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M3

Tabela 4.17 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficazes do ponto M3

Tabela 4.18 : Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M3

Tabela 4.19 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M3

Tabela 4.20 : Valores estatísticos das tensões Eficazes do ponto M4

Tabela 4.21: Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M4

Tabela 4.22 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M4

Tabela 4.23 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficazes do ponto M4

Tabela 4.24 : Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M4

Tabela 4.25 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M4

Tabela 4.26 : Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M5

Tabela 4.27 : Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M5

Tabela 4.28: Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M5

Tabela 4.29 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente Eficazes do ponto M5

Tabela 4.30 : Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M5

Tabela 4.31 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M5

Tabela 4.32 : Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M6

Tabela 4.33 : Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M6

Tabela 4.34 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M6

Tabela 4.35 : Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente Eficazes do ponto M6

Tabela 4.36 : Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M6

Tabela 4.37 : Valores mínimos, máximos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M6

Tabela 5.1 : Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta o Forno Panela.

Tabela 5.2 : Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta o Forno EBT.

Tabela 5.3 : Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta a Laminação.

Tabela 5.4 : Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta a Redução Direta

Tabela 5.5 : Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta a Usina.

Tabela 5.6 : Valores Medidos e simulados na barra de entrada da Subestação Principal.

Tabela 5.7 : Variação do fator de qualidade no projeto do filtro anti-ressonante.

LISTA DE SIGLAS

EP: Eletrônica de Potência

QEE: Qualidade da Energia Elétrica

FP: Fator de Potência

PAC: Ponto de Acoplamento comum

UPQC: Unified Power Quality Conditioner,

UPFC: Unified Power Flow Controller

DHT_v: Distorção Harmônica Total de Tensão

DHT_i: Distorção Harmônica Total de Corrente

DTD: Distorção Total de Demanda

F_{HL}: Fator de Perdas Harmônicas

c.a. : Corrente Alternada

c.c. : Corrente Contínua

ONS: Operador Nacional do Sistema

PB: Passa Baixa

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica

IEEE: Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 MOTIVAÇÃO E PRINCIPAIS OBJETIVOS DO TRABALHO.....	12
1.2 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO	13
1.2.1 Eletrônica de Potência e a Qualidade de Energia Elétrica.....	13
1.2.2 Métodos para a Atenuação Harmônica	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2. HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO	17
2.1 INDICADORES HARMÔNICOS	17
2.1.1 Distorção Harmônica Total (DHT)	17
2.1.2 Distorção Total de Demanda (DTD)	18
2.1.3 Fator K.....	19
2.1.4 Fator de Perdas Harmônicas (F_{HL})	19
2.2 EQUIPAMENTOS GERADORES DE HARMÔNICOS	20
2.2.1 Conversores Estáticos.....	21
2.2.2 Transformadores	28
2.2.3 Motores de Indução	29
2.2.4 Fornos a arco elétrico.....	30
2.3 EQUIPAMENTOS E COMPONENTES SENSÍVEIS AOS HARMÔNICOS.....	32
2.3.1 Máquinas elétricas (geradores e motores).....	32
2.3.2 Transformadores	33
2.3.3 Banco de capacitores.....	34
2.3.4 Sistemas de proteção.....	36
2.3.5 Sistemas de comunicação.....	37
2.4 GUIAS EXISTENTES SOBRE HARMÔNICOS E LIMITES DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	37
2.4.1 Guia IEEE Std 519-1992.....	37
2.4.2 Normas IEC da série 61000	39
2.4.3 Procedimento de rede - Submódulo 2.8	42
2.4.4 Comparação entre as recomendações	43
2.4.5 Limites para as Variações de Tensão em Regime Permanente.....	44
2.5 CONCLUSÕES GERAIS	45
3. FILTROS DE HARMÔNICOS	46
3.1 INTRODUÇÃO	46
3.2 TIPOS DE FILTROS	47
3.2.1 Localização	47
3.2.2 Modos de Conexão.....	47
3.2.3 Largura da faixa de sintonia	49
3.3 DEFINIÇÕES	49
3.3.1 Fator de qualidade.....	49
3.3.2 Fator de Dessintonia.....	50
3.4 PROJETO DE FILTROS SINTONIZADOS	51
3.4.1 Filtros sintonizados simples.....	51
3.4.2 Efeito da impedância da rede na filtragem	55
3.4.3 Impedância da rede c.a. (Z_{hr}).....	56
3.5 PROJETO DE FILTROS AMORTECIDOS PASSA-ALTA.....	57
3.5.1 Tipos de filtros amortecidos	58
3.5.2 Impedância.....	59
3.6 PROPRIEDADES DOS COMPONENTES DOS FILTROS.....	60
3.6.1 Capacitores	60
3.6.2 Reatores	61
3.7 CRITÉRIOS PRÁTICOS DE PROJETO DE FILTROS	62
3.7.1 Potência e configuração típica dos filtros.....	62
3.7.2 Conexão e dimensionamento dos componentes dos filtros.....	64

3.7.3 Fator de Potência	65
3.7.4 Proteção de Filtros	65
3.7.5 Custo de filtros	67
3.8 CONCLUSÕES GERAIS	68
4 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE UM CONSUMIDOR INDUSTRIAL	69
4.1 SISTEMA ELÉTRICO	70
4.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO NA MEDIÇÃO	71
4.3 PONTO DE MEDIÇÃO M1 – TRANSFORMADOR TR-01	72
4.3.1 Análise das Tensões	72
4.3.2 Análise das Correntes	75
4.4 PONTO DE MEDIÇÃO M2 – TRANSFORMADOR TR2	78
4.4.1 Análise das Tensões	78
4.4.2 Análise das Correntes	81
4.5 PONTO DE MEDIÇÃO M3 – TRANSFORMADOR TR3	83
4.5.1 Análise das Tensões	83
4.5.2 Análise das Correntes	85
4.6 PONTO DE MEDIÇÃO M4 – TRANSFORMADOR TR4	88
4.6.1 Análise das Tensões	88
4.6.2 Análise das Correntes	90
4.7 PONTO DE MEDIÇÃO M5 – TRANSFORMADOR TR5	93
4.7.1 Medições de Tensão	93
4.7.2 Análise das Correntes	95
4.8 PONTO DE MEDIÇÃO M6 – PONTO DE ENTREGA EM 230kV	97
4.8.1 Análise das Tensões	98
4.8.2 Análise das Correntes	99
4.9 CONCLUSÕES GERAIS	102
5 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO	104
5.1 MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO DO CONSUMIDOR INDUSTRIAL	104
5.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO	106
5.3 CÁLCULO DO BANCO DE CAPACITORES	108
5.4 CONCLUSÕES GERAIS	110
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	111
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
APÊNDICE A - EXEMPLO DE ESPECIFICAÇÃO DE FILTROS	116
A.1 ANÁLISE DE RESSONÂNCIA HARMÔNICA	117
A.2 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE FILTROS	118
A.3 DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS	118
A.4 PROJETO FINAL DO CONJUNTO DE FILTROS	121
APÊNDICE B – DIAGRAMAS UNIFILARES DO SISTEMA ELÉTRICO	124
APÊNDICE C – PROCESSO SIDERÚRGICO	127

RESUMO

O trabalho apresenta uma revisão geral sobre os indicadores relacionados a harmônicos, equipamentos que geram estas distorções e equipamentos sensíveis a estes distúrbios na rede elétrica. São utilizados alguns documento referentes ao assunto de distorções harmônicas são tais como: as recomendações do IEEE 519-1992, os “Procedimentos de Rede do ONS” no seu submódulo 2.8 e o conjunto de normas IEC série 61000.

Os filtros harmônicos são utilizados para reduzir as distorções causadas por equipamentos com comportamento não-linear. O projeto destes filtros, as definições existentes e a avaliação de cada tipo de filtro são apresentados juntamente com os critérios práticos de seleção.

As medições no sistema elétrico de um grande consumidor industrial são realizadas com o intuito de identificar injeções harmônicas desta empresa na rede elétrica da concessionária. Os medidores de energia são instalados no secundário dos principais transformadores da empresa e na entrada da subestação para obter estes dados.

Após o trabalho de campo de coleta de dados, o sistema elétrico é modelado no Simulink/Matlab. A simulação incorpora um modelo simplificado da rede elétrica incluindo a alimentação proveniente da concessionária, as linhas de transmissão e distribuição, os principais transformadores, as cargas e os harmônicos presentes em cada um dos alimentadores. A partir da análise da situação da empresa busca-se propor melhorias para que a mesma possa operar sem prejudicar o sistema ao qual está conectada e atender os limites das distorções harmônicas de tensão presentes no submódulo 2.8 do Operador Nacional do Sistema e a melhoria do fator de potência.

Palavras-Chaves: Cargas não-lineares, Medição de Distorções Harmônicas, Filtros Harmônicos, Qualidade de Energia

ABSTRACT

This work presents an overview about harmonics indicators, equipment that generate these distortions and sensitive equipment to these disturbances in the electrical system. Some standards on harmonics are discussed; among them IEEE 519 and the “Network Procedures ONS” were used as reference for evaluating the measured signals and check the conditions of the installation.

The harmonic filters are used to reduce the distortions caused by non-linear actions equipment. The designs these filters, the existing definitions, and the evaluation each filter types are present together with practical criteria for selection.

The measurements in the electrical system were taken in the large industrial consumer in order to identify harmonic injections this company on the concessionaire network. The energy measurements were installed in the secondary of the main transformers of the company and entry substation to obtain these data.

After the work data collection the electrical system was modeled on Simulink / Matlab. It simulation a simplified model of the electrical network including power from the concessionaire, transmission and distribution lines, the main transformers, loads and harmonics present in each of the feeders. From the analysis of the company seeks to propose improvements to enable to operate without harming the system that is connected and attend the limits of harmonic voltage distortion, recommended by the ONS and the power factor.

Keywords: nonlinear loads, Measurement of Harmonics Distortion, Harmonics Filters, Power Quality

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de equipamentos baseada na eletrônica de potência (EP) desperta a importância da relação entre esta área da engenharia elétrica e a qualidade de energia elétrica (QEE). Apesar de proporcionar um controle eficiente do fluxo de energia, estas cargas produzem tensão e/ou correntes harmônicas que acarretam aumento das perturbações originadas pela distorção harmônica em sistemas elétricos, resultando na piora da qualidade da energia elétrica [1, 2].

Sendo assim, é necessário medir o conteúdo harmônico do sistema para que se possa determinar uma forma de se mitigar os problemas de distorção harmônica. Neste trabalho foram analisados os harmônicos gerados por um grande consumidor industrial e avaliada a necessidade de correção das distorções harmônicas geradas, caso exceda os limites recomendados pelo IEEE 519-1992 e aos Procedimentos de Rede submódulo 2.8.

1.1 Motivação e Principais Objetivos do Trabalho

O sistema elétrico de uma empresa siderúrgica está sujeito a diversas formas de geração de harmônicos. Além de possuir diversos equipamentos com tecnologia baseada em eletrônica de potência (conversores, retificadores, etc.), a planta industrial analisada utiliza fornos a arco elétrico no processo de fusão da matéria-prima, que são cargas extremamente não lineares.

Durante a fase de revisão bibliográfica foi possível verificar que poucos trabalhos publicados na literatura utilizavam dados a partir de uma planta real de um grande consumidor industrial. Esta avaliação é importante para a empresa e para a concessionária. A primeira deve atender aos limites de distorções impostos pelas normas existentes. A segunda necessita garantir uma maior eficiência no seu trabalho de geração e distribuição de energia. Dessa forma esta avaliação é importante para ambas.

Notou-se na referida revisão bibliográfica o baixo número de publicações preocupadas com o tipo de carga não-linear a ser compensada. A grande maioria das publicações está focada na compensação de cargas genéricas, deixando em segundo plano a discussão sobre as características das cargas produtoras de harmônicos [3]. Este fato

prejudica a avaliação dos métodos de compensação normalmente utilizados, dificultando a reprodução dos respectivos resultados.

O trabalho tem como objetivo principal apresentar um amplo diagnóstico, em uma empresa específica, de sua atual situação de injeção harmônica no sistema da concessionária. Após este diagnóstico, o objetivo é analisar os efeitos das distorções harmônicas geradas pela planta industrial. A partir desta análise, propor um método para amenizar as distorções geradas no seu sistema elétrico.

1.2 Justificativas do Trabalho

A determinação do conteúdo harmônico e a sua eliminação, ou pelo menos sua mitigação, contribuem para a melhora na QEE. O primeiro serve para avaliar e o segundo diminui a degradação da QEE. Para se adaptar à realidade atual do setor energético, onde problemas ambientais e de custos na geração de energia elétrica dificultam novos investimentos, há a necessidade de se obter o máximo de eficiência com a diminuição das perdas no sistema, isto é, deve-se melhorar a qualidade de energia do sistema. Uma forma de obter estes resultados é realizar o controle dos fluxos da potência ativa, reativa e harmônica [1, 2].

1.2.1 Eletrônica de Potência e a Qualidade de Energia Elétrica

A poluição harmônica gerada por cargas não-lineares, sobretudo fornos a arco pode causar problemas significativos de distorção harmônica. Esta poluição não está restrita somente aos ambientes industriais, mas também está presente em ambientes residenciais e comerciais. Ademais, o fluxo da corrente harmônica pelo sistema resulta em uma série de efeitos indesejáveis, tais perdas pelo aquecimento em máquinas rotativas, interferência nos mecanismos de operação de equipamentos de proteção, problemas de ressonância e aumento das perdas por aquecimento em banco de capacitores paralelos.

Dentre as cargas não lineares podemos destacar as seguintes: retificadores, fontes de tensão chaveadas, acionadores de velocidade variável, fornos a arco, dispositivos saturáveis, laminadores, entre outros. Estes equipamentos comportam-se como fontes de correntes harmônicas [3].

1.2.2 Métodos para a Atenuação Harmônica

Várias pesquisas e publicações têm sido encontradas com relação ao assunto filtros harmônicos e, portanto, neste momento, torna-se necessário relatar os resultados dos trabalhos bibliográficos analisados. Neste contexto, é possível encontrar diversas técnicas para reduzir os sinais harmônicos de tensão e/ou corrente. Estas, de um modo global, podem ser agrupadas nas estratégias abaixo caracterizadas:

- Uso de filtros passivos conectados em paralelo e/ou em série com o sistema elétrico[4];
- Aumento da quantidade de pulsos em unidades conversoras, com o uso de transformadores defasadores [5];
- Técnicas de compensação de fluxo magnético [6];
- Filtros ativos de potência conectados em paralelo e/ou em série com o sistema elétrico [7];

A escolha de um ou outro procedimento, ou mesmo, a associação de soluções, deve levar em conta a análise dos seguintes aspectos:

- Conhecimento do sistema de alimentação do ponto de vista da concessionária: impedância de curto-circuito, nível de tensão e legislação quanto aos níveis de distorções harmônicas permitidos;
- Conhecimento do sistema consumidor: tipos de cargas instaladas, potência envolvida, problemas que ocorrem devido aos harmônicos, perda de energia, diminuição do fator de potência real;
- Local da instalação do dispositivo para redução de harmônicos;
- Desempenho e capacidade nominal de tensão/corrente do dispositivo;
- Custo inicial de compra e custo da energia consumida no próprio dispositivo;
- Efeitos colaterais prejudiciais sobre o sistema de alimentação: o fator de potência em situações de carga nominal pode se alterar em condições de carga baixa, modificação do nível e da distorção de tensão ou de corrente, alteração do nível de curto-circuito para a terra, mudança ou possibilidade de ressonância em outras frequências harmônicas. Em decorrência desses fenômenos, pode haver possíveis efeitos nocivos sobre outras cargas consumidoras adjacentes;
- Efeitos colaterais prejudiciais ao funcionamento das cargas elétricas envolvidas: aumento da distorção de tensão de alimentação da carga, sua queda ou sua elevação;
- Influências nocivas das variações do sistema sobre o dispositivo utilizado: alterações da impedância do sistema, correntes harmônicas de cargas consumidoras adjacentes

podem entrar pela alimentação, o sistema pode desequilibrar-se em tensão, a distorção de tensão e o seu nível na barra de alimentação podem variar devido a fatores externos;

- Influência da carga sobre a técnica utilizada: a variação da potência solicitada pela carga e a presença de desequilíbrios podem alterar o funcionamento do dispositivo empregado para a redução de harmônicos.

Dentre as alternativas relacionadas como possíveis estratégias para a eliminação/redução das correntes harmônicas, aquelas associadas aos filtros ativos e passivos são, comumente, as mais empregadas. Devido a este fato, estas duas metodologias serão consideradas com mais detalhes na seqüência.

Os filtros passivos são formados a partir de várias combinações dos elementos tipo R, L e C, podendo ser conectados em paralelo ou em série ao sistema elétrico. Aqueles conectados em paralelo (derivação, ou *shunt*), têm sido amplamente estudados e aplicados em sistemas elétricos [8]. Ao longo de vários anos, devido a fatores tecnológicos e econômicos, esta tem se firmado como a solução mais tradicional para a redução de harmônicos. Estes dispositivos podem ser classificados em dois grupos: sintonizados e amortecidos. Os filtros em derivação sintonizados são baseados no fenômeno da ressonância, que deve ocorrer para uma ou mais frequências harmônicas a serem eliminadas, apresentando, nesta situação, uma baixa impedância resistiva para as mesmas. Os filtros em derivação amortecidos são constituídos por circuitos que oferecem uma baixa impedância ao longo de uma larga faixa de frequência. Na prática, são encontradas configurações que combinam o uso de filtros sintonizados para ordens harmônicas individuais (até a 13ª, por exemplo) e amortecidos para as frequências superiores [5]. Uma outra função dos filtros sintonizados e amortecidos é que, para as frequências abaixo da frequência de ressonância, apresentam-se como circuitos capacitivos, sendo, portanto, compensadores de potência reativa na frequência fundamental.

A utilização de filtros ativos, constituídos por componentes eletrônicos de potência e de controle analógico e/ou digital, tem evoluído notavelmente, sobretudo a partir de 1980. Os tipos básicos de filtros ativos são: paralelo, série, série/paralelo combinados e híbridos (que combinam técnicas ativas e passivas). Os métodos de operação dos filtros ativos atuais são fundamentados na teoria das potências ativa e reativa instantâneas [9].

Os filtros ativos paralelos atuam através de um processo de detecção, sintetização e aplicação de correntes harmônicas contrárias àquelas produzidas pela carga não-linear, podendo ainda atuar sobre a corrente na frequência fundamental, promovendo a

compensação reativa. Um filtro ativo paralelo típico é composto basicamente por um inversor de tensão ou de corrente, acionado por técnicas específicas de controle.

Por fim, tem-se a associação dos filtros passivos com os filtros ativos, chamados de filtros híbridos. Esta solução reduz o custo inicial da instalação e obtém uma maior eficiência na diminuição do conteúdo harmônico [11].

De uma maneira geral, a utilização de filtros ativos para o controle de distorções harmônicas de tensão e/ou corrente se apresenta como opção eficiente para tal fim, apresentando, porém, altos custos.

1.3 Organização do Trabalho

Este Capítulo 1 apresentou o tema principal deste trabalho, destacando os objetivos e as questões importantes que levaram a tratar do assunto.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre as definições básicas relacionadas com a QEE. Esta revisão tem o objetivo de demonstrar a relação entre a QEE e a Eletrônica de Potência. Além disso, estão relacionados diversos equipamentos que geram harmônicos e também os efeitos desta distorção harmônica na rede elétrica. Por fim, são apresentadas as normas com os limites de distorção permitidos [13; 28].

No Capítulo 3 são apresentadas informações sobre os filtros para redução dos harmônicos quais sejam: critérios de seleção, tipos de filtro, custo e noções sobre projeto.

No Capítulo 4 é apresentado a configuração do sistema elétrico de um grande consumidor industrial com seus respectivos componentes e cargas alimentadas. A partir das medições realizadas é feita a análise de todos os pontos de medição de corrente e de tensão para avaliar a injeção de harmônicos na rede elétrica gerados pelas instalações da empresa.

O Capítulo 5 apresenta a modelagem da planta estudada com suas características e peculiaridades. A partir dos resultados da simulação e medição são identificados e corrigidos os pontos em desacordo com as recomendações do Operador Nacional do Sistema.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho com todas as medidas tomadas para amenizar os harmônicos gerados pelo sistema em questão e propostas para trabalhos futuros.

2. HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Os tipos de fontes geradoras de harmônicos presentes no sistema de potência são bastante variados, em vista da gama de equipamentos não só das concessionárias, mas também dos consumidores, principalmente industriais, que constituem uma parcela considerável da carga suprida.

Neste capítulo são apresentados alguns indicadores relacionados ao estudo de componentes harmônicas em um sistema elétrico. São abordadas também, em detalhes, as principais cargas que produzem harmônicos nos sistemas industriais, objetivando um maior entendimento de suas características.

Posteriormente, uma vez conhecida às fontes de harmônicos e suas respectivas intensidades, são avaliados os seus efeitos no sistema elétrico e na operação dos equipamentos.

2.1 Indicadores harmônicos

Como os harmônicos (ou componentes harmônicas) causam problemas de qualidade de energia, é necessária a sua regulamentação através de normas que assegurem o nível máximo de harmônicos tolerados. Para isso é necessário que sejam utilizados indicadores para a quantificação e análise dos efeitos dos harmônicos. Nos próximos subitens são apresentados os principais indicadores de harmônicos utilizados neste texto.

2.1.1 Distorção Harmônica Total (DHT)

Este indicador é o mais utilizado para quantificar harmônicos, sendo adotado como parâmetro pelas principais referências mundiais [12], [29] e [32]. É importante perceber que a DHT pode ser calculada para corrente ou tensão e que a mesma não é uma informação completa, uma vez que apenas seu valor não é suficiente para quantificar a influência dos harmônicos presentes no local de medição no sistema. A DHT de tensão (DHT_v) e a DHT de corrente (DHT_i) são dadas por:

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_1} \quad (2.2)$$

onde,

h – número inteiro (ordem harmônica)

V_h – valor rms da componente de tensão harmônica h

V_1 – valor rms de tensão fundamental

I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h

I_1 – valor rms de corrente fundamental

É necessário que o especialista analise o valor da DHT e o valor da magnitude da tensão ou corrente para que o mesmo avalie as distorções os efeitos dos harmônicos naquele local. Por exemplo, pode-se pensar em princípio que uma distorção harmônica de 100% encontrada na corrente de alimentação de um equipamento causaria problemas na rede, porém, se considerado que esse equipamento possui uma corrente muito baixa diante da corrente total da rede, as amplitudes dos harmônicos serão pequenas e facilmente “diluídas” pelas outras cargas ligadas ao mesmo alimentador. Porém, se o equipamento com DHT de 100% possui uma corrente alta em relação às outras cargas ligadas ao alimentador, com certeza esse conteúdo harmônico será nocivo à rede.

2.1.2 Distorção Total de Demanda (DTD)

Este indicador é utilizado pela recomendação IEEE 519 [1] para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. Sua formulação matemática é bastante similar ao DHT, tendo como diferença o fato de que a DTD é calculada em relação à corrente máxima da carga e a DHT utiliza a corrente fundamental no horário da medição. O valor da DTD é uma informação completa uma vez que sempre é calculada em relação à corrente máxima. Assim, se o valor encontrado para

a DTD for alto, pode se afirmar que há elevada circulação de harmônicos naquele sistema [2]. A DTD é dada por:

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_L} \quad (2.3)$$

Em que,

I_L - Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema

I_h - Valor rms da componente de corrente harmônica h

2.1.3 Fator K

Este fator, amplamente utilizado por projetistas de transformadores [13], é usado para se calcular o aumento do aquecimento de um transformador devido à circulação de correntes harmônicas. O fator K pode ser calculado através da relação:

$$Fator K = \sum_{h=1}^{h \max} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \times h^2 \quad (2.4)$$

em que,

I_R – Corrente nominal rms total; I_h – Corrente no harmônico h

h – Ordem do harmônico

2.1.4 Fator de Perdas Harmônicas (F_{HL})

Um outro fator também utilizado para se quantificar a diminuição do carregamento de um transformador na presença de harmônicos é o F_{HL} , que representa o aquecimento efetivo gerado no transformador como resultado de uma determinada corrente harmônica. Este fator pode ser calculado através da equação: [13]

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h \max} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2}{\sum_{h=1}^{h \max} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (2.5)$$

A principal diferença entre o fator K e o F_{HL} está ligada ao fato de que o fator K depende tanto da magnitude quanto da distribuição dos harmônicos da corrente, enquanto o F_{HL} é apenas dependente da distribuição dos harmônicos [13]. Dessa forma, caso haja medições em transformadores de potências nominais diferentes que apresentem uma distribuição harmônica similar, estes terão o mesmo F_{HL} enquanto que o fator K variará com a diferença entre as amplitudes das correntes em cada transformador. Estes dois fatores são relacionados através de:

$$\text{Fator } K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (2.6)$$

2.2 Equipamentos Geradores de Harmônicos

No passado as distorções harmônicas nos sistemas de potência eram primordialmente associadas ao projeto e operação dos transformadores e máquinas elétricas. De fato, a principal fonte de distorções harmônicas eram as correntes de magnetização dos transformadores. Os geradores elétricos constituíam a segunda fonte de harmônicos, uma vez que aspectos práticos e econômicos de projeto requeriam que alguns desvios da forma de onda senoidal ideal fossem aceitos. Embora os transformadores e máquinas rotativas, em regime permanente e em condições normais de operação, não causem distorções significativas na rede elétrica durante condições transitórias ou quando operam fora de suas condições normais, tais equipamentos podem aumentar consideravelmente suas contribuições harmônicas.

Por outro lado, com o maior uso de equipamentos eletrônicos (retificadores a diodo, Mosfet e SCR) aumentou-se drasticamente as cargas não lineares no sistema elétrico. Devido a isso, dentre as principais fontes geradoras de harmônicos, atualmente destacam-se os conversores estáticos de potência. Em adição a estes, outras cargas não lineares como

os compensadores estáticos de reativos, os fornos elétricos a arco, etc., constituem-se em potenciais fontes de harmônicos para os sistemas elétricos [14].

2.2.1 Conversores Estáticos

Sob o ponto de vista da rede c.a. de alimentação, os conversores estáticos controlados (retificadores e inversores) constituem uma das fontes mais expressivas de correntes harmônicas. Esses equipamentos podem ser resumidos em 3 grandes grupos:

- Conversores de alta potência, como aqueles usados em transmissão c.c. e na indústria de redução de metais;
- Conversores de média potência, usados para o controle de motores em indústrias e tração ferroviária;
- Conversores de baixa potência (retificadores), alimentando cargas monofásicas, como aparelhos de televisão e carregadores de bateria.

Conversores de Alta Potência

Os conversores de alta potência (na faixa dos MW) são geralmente equipados com uma indutância de valor muito elevado no lado c.c.. Devido a isso, a corrente c.c. é razoavelmente constante e o conversor age como fonte de harmônicos de tensão, no lado c.c., e harmônicos de corrente no lado c.a..

De acordo com a teoria clássica, um conversor com número p de pulsos gera, sob condições ideais harmônicos de corrente de ordem $n = pK \pm 1$, no lado c.a. e harmônicos de tensão de ordem $n = pK$ no lado c.c., onde K é um número inteiro (1, 2, 3, ...) e p corresponde ao número de comutações não simultâneas por ciclo de tensão alternada fundamental. Os harmônicos que possuem ordem de acordo com estas equações são chamados harmônicos característicos [15].

a) Harmônicos em conversores de 6 pulsos

Dois conversores com índice de pulsação igual a 3 podem ser conectados em série para resultar num conversor trifásico com índice de pulsação igual a 6. A carga é alimentada pelos dois grupos e o circuito em ponte resultante é mostrado na Figura 2.1.

Supondo que a comutação seja instantânea e a indutância $L_d = \infty$, a corrente de fase de uma configuração bidirecional consiste de pulsos retangulares alternados positivos e negativos tais que $F(\omega t + \pi) = -F(\omega t)$, onde F é a função que define a amplitude dos pulsos.

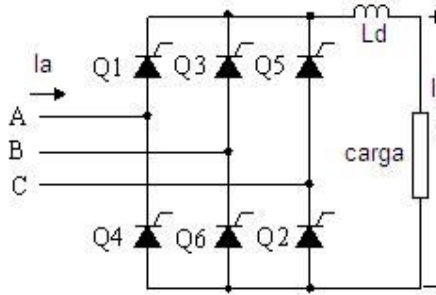


Figura 2.1 – Configuração de retificador de 6 pulsos.

A sua série de Fourier é resultado da combinação das séries de Fourier correspondentes, para pulsos retangulares de corrente positiva e negativa, obtendo-se para o conversor da Figura 2.1, a equação 2.7 para a corrente i_a , em função de I_d :

$$i_a = \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left[\cos \omega t - \left(\frac{1}{5} \right) \cos 5\omega t + \left(\frac{1}{7} \right) \cos 7\omega t - \left(\frac{1}{11} \right) \cos 11\omega t + \left(\frac{1}{13} \right) \cos 13\omega t - \left(\frac{1}{17} \right) \cos 17\omega t + \dots \right] \quad (2.7)$$

Da equação 2.7 podem ser feitas as seguintes observações, com relação aos harmônicos gerados por conversores de 6 pulsos:

- Ausência de harmônicos múltiplos de ordem 3;
- Presença de harmônicos de ordem $6K \pm 1$ para valores inteiros de K ;
- Os harmônicos de ordens $6K + 1$ são de seqüência positiva (7, 13, ...) e os harmônicos de ordens $6K - 1$ são de seqüência negativa (5, 11, 17, ...);
- O valor eficaz da corrente, na frequência fundamental é:

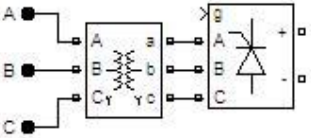
$$I_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) I_d ;$$

- O valor eficaz da corrente harmônica de ordem h é: $I_h = \frac{I_1}{h}$. A tabela 2.1 resume as características dos retificadores de 6 pulsos.

b) Harmônicos em Conversores de 12 pulsos

A configuração para conversores de 12 pulsos é formada por dois grupos de 6 pulsos alimentados por dois transformadores trifásicos em paralelo, com suas tensões fundamentais iguais e defasadas 30°. Além disso, para manter a operação de 12 pulsos os 2 grupos de 6 pulsos devem trabalhar com mesmo controle de ângulo, e portanto as correntes de frequência fundamental nos primários dos dois transformadores estarão em fase [15].

Tabela 2.1 – Características harmônicas dos retificadores de 6 pulsos.

Arranjo	expressão	K	Ordem Harmônica	Frequência	Corrente harmonica % da fundamental
	6K±1	0	Fundamental	60	-
		1	5º Harmônico	300	20
			7º Harmônico	420	14,2
		2	11º Harmônico	660	9,09
			13º Harmônico	780	7,69
		3	17º Harmônico	1020	5,88
			19º Harmônico	1140	5,26
		4	23º Harmônico	1380	4,35
			25º Harmônico	1500	4
		x	(6x-1)º	60(6x-1)	100/(6x-1)
(6x+1)º	60(6x+1)		100/(6x+1)		

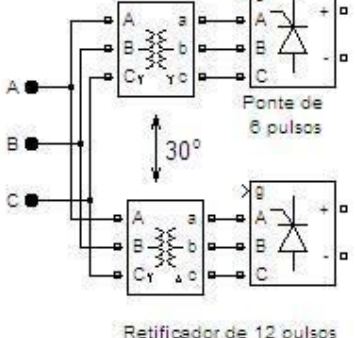
Da equação 2.8 podem ser feitas as seguintes observações, com relação aos harmônicos gerados por conversores de 12 pulsos:

$$i_{a12} = 2 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d \left[\cos wt - \left(\frac{1}{11} \right) \cos 11wt + \left(\frac{1}{13} \right) \cos 13wt - \left(\frac{1}{23} \right) \cos 23wt + \left(\frac{1}{25} \right) \cos 25wt \dots \right] \quad (2.8)$$

- A série contém, somente harmônicos de ordens 12K±1;
- As correntes harmônicas de ordens 6K+1 com K (K= 7, 17, 19,...) circulam entre os dois transformadores-conversores mas, não penetram no sistema c.a..

A tabela 2.2 resume as características dos retificadores de 12 pulsos.

Tabela 2.2 – Características harmônicas dos retificadores de 12 pulsos.

Arranjo	Expressão	K	Ordem Harmônica	Frequência
	12K±1	0	Fundamental	60
		1	11º Harmônico	660
			13º Harmônico	780
		2	23º Harmônico	1380
			25º Harmônico	1500
		3	35º Harmônico	2100
			37º Harmônico	2220
x	(12x-1)º	60(12x-1)		
	(12x+1)º	60(12x+1)		

c) Harmônicos em Conversores de 24 pulsos

A colocação de transformadores adequadamente defasados em paralelo é o princípio para aumento de pulsos nas configurações.

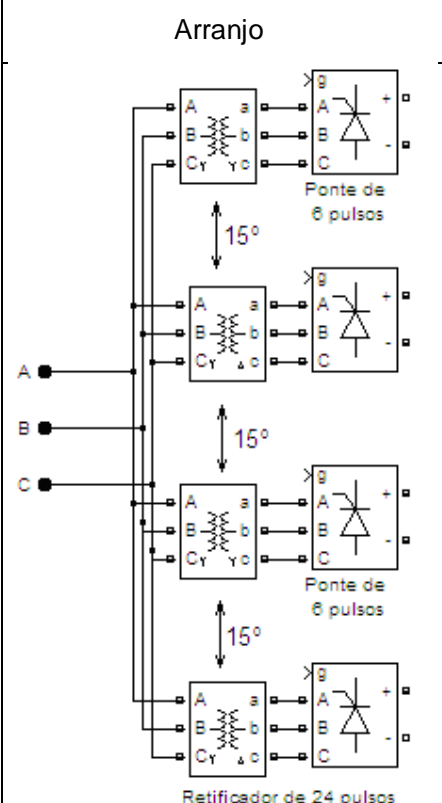
Sendo assim a operação com 24 pulsos é conseguida por meio de 4 transformadores defasados de 15 ° entre eles. A tabela 2.3 resume as características dos retificadores de 24 pulsos.

Da mesma forma para a operação com 48 pulsos é necessário a colocação de 8 transformadores em paralelos com defasamento de 7,5° entre eles.

De uma forma geral, as correntes harmônicas teóricas são relacionadas ao número de pulsos p pela expressão geral $pK \pm 1$ e suas amplitudes decrescem na proporção inversa à ordem harmônica. Geralmente, harmônicos acima da 49º ordem podem ser desprezados.

Outro aspecto que deve ser abordado é com respeito ao grupo conversor operando sob condições desequilibradas. Por exemplo, se uma das quatro unidades retificadoras de um sistema de 24 pulsos sair de serviço (por falha ou manutenção) e o sistema continuar a operar, surgem harmônicos residuais que são aqueles gerados por retificadores de 12 pulsos, associados com aqueles gerados por retificadores a 6 pulsos. Sistemas de retificação de linhas de fornos de redução de alumina em geral são capazes de funcionar a plena carga com uma unidade fora de serviço [15].

Tabela 2.3 – Características harmônicas dos retificadores de 24 pulsos.

Arranjo	Expressão	K	Ordem Harmônica	Frequência
	24K±1	0	Fundamental	60
		1	23º armônico	1380
			25º armônico	1500
		2	47º armônico	2820
			49º armônico	2940
		x	(24x-1)º	60(24x-1)
(24x+1)º	60(24x+1)			

Conversores de Média Potência

Esses conversores têm capacidade da ordem de dezenas a centenas de kW. Tem uma grande aplicação nas indústrias principalmente para o controle de velocidade de motores de corrente alternada.

a) Conversor para acionamento de motor de corrente contínua

Um método descrito em [5] obtêm os harmônicos da corrente alternada, em função da relação definida como:

$$r = \frac{I_r}{I_d} \quad (2.9)$$

I_r é o “ripple” de corrente de saída

I_d é a corrente média de saída

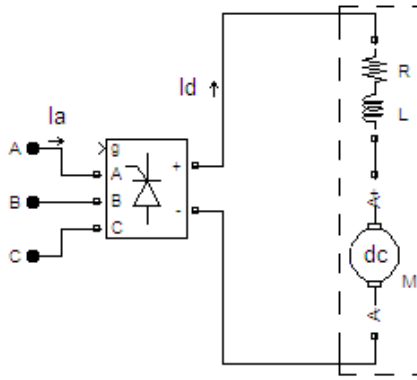


Figura 2.2 – Motor c.c. acionado por um retificador de 6 pulsos totalmente controlado

Pela aplicação da análise de Fourier, obtêm-se as seguintes expressões ($I_1\%$ - componente fundamental da corrente):

$$\text{Fundamental:} \quad I_1 = I_d(1,102 + 0,014r) \quad (2.10)$$

$$\text{Harmônicos:} \quad p/h = pK - 1(\%I_1) \quad (2.11)$$

$$I_h = 100 \left[\frac{1}{2} + \frac{6,46r}{(h-1)} - \frac{7,13r}{h} \right] (-1)^k \quad (2.12)$$

$$\text{Harmônicos:} \quad p/h = pK + 1(\%I_1) \quad (2.13)$$

$$I_h = 100 \left[\frac{1}{h} + \frac{6,46r}{(h+1)} - \frac{7,13r}{h} \right] (-1)^k \quad (2.14)$$

Nesta configuração, o 5º harmônico pode alcançar níveis bem elevados em relação aos outros harmônicos, principalmente se for aumentado o “ripple” da corrente de saída.

b) Ponte retificadora mista

Este tipo de conversor tem sido largamente preferido em alguns países pelo seu mais baixo custo (só utiliza 3 tiristores).

Quando operado em plena carga o conversor produz praticamente as mesmas correntes harmônicas da ponte totalmente controlada. No entanto, em carga leve, ele não só tem um baixo fator de potência mas introduz distorção harmônica severa na corrente, particularmente nos harmônicos pares.

Como conversores e motores são freqüentemente dimensionados para atender futuras expansões, segundo [5], a operação com baixa carga pode levar o a freqüência harmônica de 2ª ordem a níveis próximos da corrente fundamental.

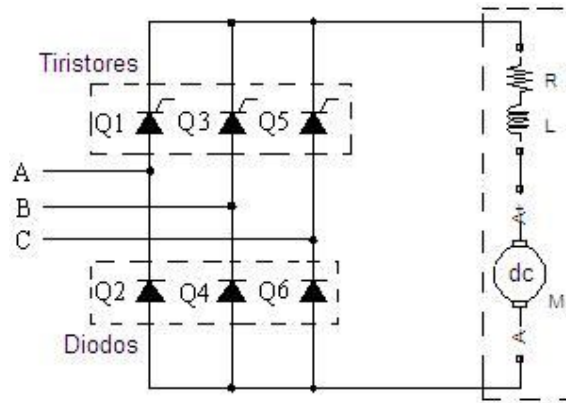


Figura 2.3 – Ponte retificadora mista

c) Inversor de frequência

A Figura 2.4 apresenta a configuração básica para um inversor de frequência.

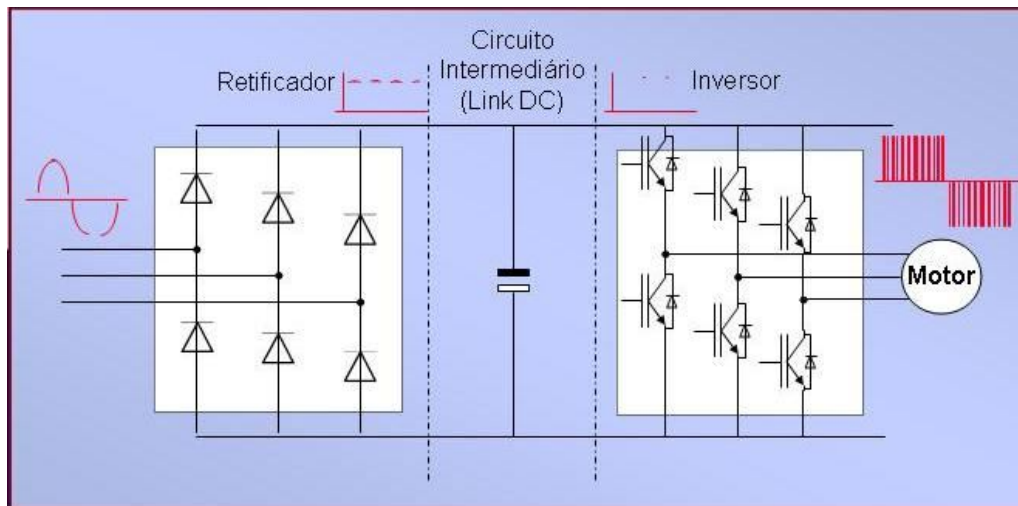


Figura 2.4 - Inversor de frequência

A tabela 2.4, apresenta as amplitudes relativas dos harmônios da tensão v_f (tensão de fase do motor), da corrente i_f (corrente de fase do motor) e do fluxo ϕ_f (fluxo de magnetização fase do motor) [16], considerando formas de onda do inversor sempre quadradas:

Tabela 2.4 – Amplitudes relativas de tensão, corrente e fluxo harmônicos/fase do motor

Grandezas	Ordem Harmônica (h)								
	1	5	7	11	13	17	19	23	25
V_f	1,0	0,20	0,143	0,091	0,077	0,059	0,053	0,043	0,04
I_f	1,0	0,40	0,02	0,008	0,066	0,004	0,003	0,002	0,002
φ_f	1,0	0,40	0,02	0,008	0,066	0,003	0,003	0,002	0,002

Considerações Gerais

O conjunto alimentador/conversor apresenta imperfeições práticas, de natureza aleatória, que dificultam a análise de harmônicos ainda na fase de projeto das instalações de conversores [15]. Dentre estas não idealidades podem ser citadas:

- As tensões do sistema de alimentação sempre apresentam algum desbalanceamento ou distorção na forma de onda;
- As impedâncias do transformador-conversor nunca são exatamente iguais nas três fases;
- Os controles do sistema de ângulo de disparo de tiristores frequentemente apresentam diferenças.

2.2.2 Transformadores

No passado, os transformadores e as máquinas rotativas constituíam as mais significativas fontes de harmônicos, na atualidade, praticamente não geram harmônicos significativos em condições normais de operação. Somente em alguns distúrbios transitórios ou operando fora das condições normais é que os transformadores podem aumentar sua contribuição harmônica [15].

A curva BxH média do ferro do transformador é apresentada pela Figura 2.5a. Então, traça-se a curva da corrente de magnetização i_{10} Figura 2.5b, em função do tempo, ponto a ponto.

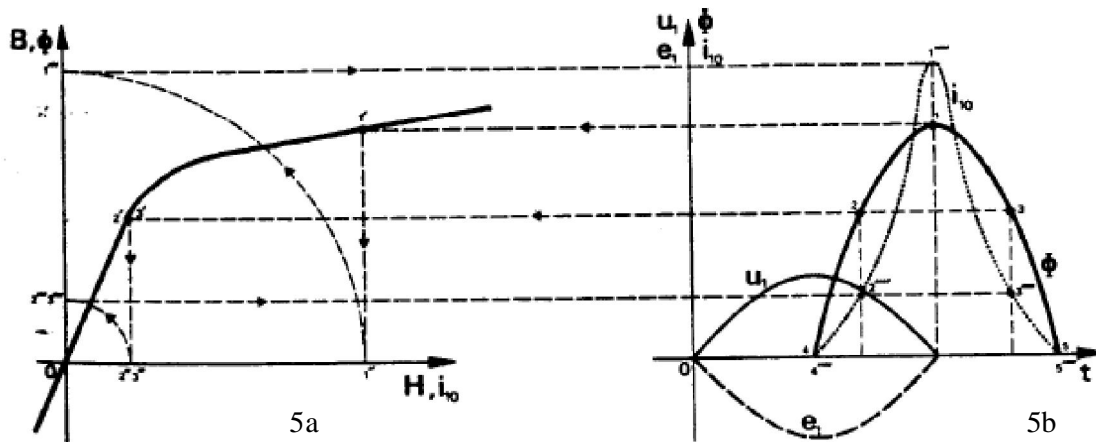


Figura 2.5 : a) curva BxH média do ferro do transformador; b) curva de magnetização. [5]

A forma de onda da corrente é periódica mas não é senoidal e pode ser decomposta em uma série de harmônicos. Como a onda de corrente é simétrica em relação ao eixo das abcissas, a decomposição resultará apenas em harmônicos ímpares. O 3º harmônico é, em geral, o que atinge maiores valores. A porcentagem de harmônicos superiores da corrente de magnetização é tanto maior quanto maior for a amplitude da densidade de fluxo.

Os harmônicos de corrente de magnetização causam maior distorção no sistema durante os períodos em que a carga a ser alimentada está reduzida resultando um aumento dos níveis de tensão [15].

Além disso, o problema de saturação de um transformador, por sobretensão, torna a corrente de magnetização composta de outros harmônicos ímpares. Considerando que os harmônicos múltiplos de 3 são retidos no enrolamento em triângulo, são geradas correntes harmônicas de ordens 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc, ou seja, os mesmos de um retificador de 6 pulsos, de harmônicos $6K \pm 1$, onde K é inteiro.

2.2.3 Motores de Indução

- Motores de Indução

Os harmônicos no tempo são produzidos pelos motores de indução, como resultado do conteúdo harmônico da distribuição espacial da f.m.m. e são dependentes da velocidade. Podem ser gerados, por exemplo, como o resultado de outras assimetrias (diferenças nos enrolamentos, pólos desbalanceados, etc.). Um exemplo de correntes

harmônicas típicas, produzidas por um motor de indução de rotor bobinado de 6 polos, 50 Hz, funcionando na velocidade de 0,9 pu, é mostrado na tabela 2.5, onde devem ser observadas as causas do aparecimento de determinadas frequências harmônicas.

Tabela 2.5 – Correntes harmônicas típicas geradas por um motor de indução de rotor bobinado [16]

Frequência Hz)	Corrente: % da Fundamental	Observações
20	3,0	Polo desbalanceado
40	2,4	Fase do rotor desbalanceada
50	100,0	Fundamental
80	2,3	Polo desbalanceado
220	2,9	5º e 7º harmônicos
320	3,0	
490	0,3	11º e 13º harmônicos
520	0,4	

2.2.4 Fornos a arco elétrico

As correntes de um forno a arco, tornam-se correntes desbalanceadas, distorcidas, e variam nas suas amplitudes a cada meio ciclo. Isto, em decorrência, não só do retardo de ignição e da resistência não linear do arco, mas, também, em consequência do movimento aleatório do arco, sob a influência combinada de forças eletromagnéticas, correntes de convecção e movimento de eletrodos.

Essa variação e a distorção gerada tendem a ser mais severas durante os 5 primeiros minutos de um ciclo de fusão, quando os eletrodos de grafite estão começando a perfurar a carga. À medida que aumenta a quantidade de metal fundido, o arco torna-se mais curto e mais estável e, o subsequente período de refino é caracterizado por correntes mais firmes, com distorção relativamente menor. A Figura 2.6 mostra a estrutura geral de um forno a arco elétrico de grande porte.

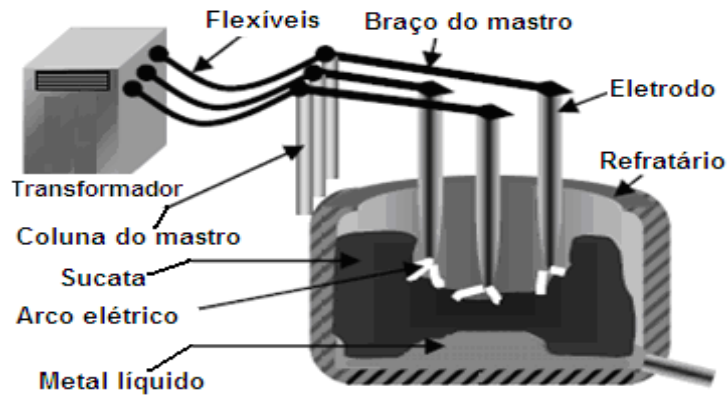


Figura 2.6 – Estrutura de um forno a arco elétrico.

É importante extrair as amplitudes espectrais nas ordens harmônicas mais baixas, para o projeto de filtros associados a fornos. A tabela 2.6 apresenta os resultados de uma análise de Fourier digital de correntes de forno, usada na especificação de filtros.

Tabela 2.6 – Análise de Fourier para correntes de forno [16].

Condição do Forno	Corrente Harmônica (% da fundamental)									
	2		3		4		5		7	
Ordem harmônica	min	max	min	max	Min	max	min	max	min	max
Fusão inicial (arco ativo)	3	8	6	10	2	6	2	10	3	6
Típico	7,7		6,2		2,5		4,2		3,1	
Refino (arco estável)			2				2,1			

Verifica-se nesta tabela, selecionada para intervalos de atividade do arco de 5 períodos consecutivos de 5 ciclos (até 30 Hz), que harmônicos de ordem mais baixas prevalecem e, que, harmônicos pares estão presentes. No refino, estes últimos virtualmente desaparecem, assim como as amplitudes decrescem consideravelmente.

Em muitos casos, os níveis harmônicos acima relacionados não apresentam maiores problemas, por si só. O problema, porém, pode-se agravar, existindo a possibilidade de uma amplificação, pela ressonância entre os capacitores de potência, que estão sempre presentes nestas instalações devido ao baixo fator de potência inerente aos fornos a arco e, a indutância do sistema.

2.3 Equipamentos e componentes sensíveis aos harmônicos

Neste item serão apresentados os principais equipamentos e componentes sensíveis aos harmônicos. Os efeitos produzidos nestes devido à presença de distorções harmônicas elevadas no sistema elétrico foram descritos de forma sucinta, permitindo uma visão global das conseqüências da circulação de harmônicos na rede elétrica.

2.3.1 Máquinas elétricas (geradores e motores)

Motores e geradores podem ser influenciados de forma significativa por elevadas DHTvs. As distorções de tensão nos terminais das máquinas geram fluxos harmônicos que, por conseguinte, induzem correntes harmônicas no rotor. Este efeito pode gerar, além da diminuição do rendimento, sobreaquecimento, vibração e barulho audível [17]. Contudo, o maior efeito é o aumento das perdas no cobre e no ferro das mesmas, gerando uma elevação de temperatura nas barras do rotor e nos enrolamentos do estator [18]. Em casos de motores com gaiola de barras profundas, onde a impedância do rotor aumenta com a frequência, podem ocorrer pontos quentes significativos para DHTvs superiores a 10%. Além da elevação de temperatura, as correntes harmônicas podem ser responsáveis por conjugados pulsantes causados pela interação entre as correntes harmônicas e o campo magnético na sua frequência fundamental [19]. As amplitudes destes conjugados são aproximadamente proporcionais às correntes harmônicas correspondentes (exemplo: uma corrente harmônica de amplitude de 10% da corrente fundamental gera um conjugado de 10% do seu valor nominal) [20].

Em [26] é realizado um estudo sobre a vida útil do isolamento de motores quando estes são submetidos aos desbalanceamentos de tensão e harmônicos. Neste estudo, os motores foram analisados através do seu modelo térmico, montado a partir de informações de placa, propriedades térmicas e coeficientes de transferência térmica. Foi constatado que existe uma considerável diminuição do tempo de vida do isolamento quando os motores são alimentados por tensões distorcidas. Esta informação foi comprovada através de simulações como a de uma máquina que é alimentada por uma fonte de tensão com DHTv igual a 7,4% e um leve desequilíbrio entre as fases (3%). Operando em carga nominal, a redução de vida útil do isolamento desta máquina elétrica foi de 24,3 %.

2.3.2 Transformadores

Os transformadores são projetados para funcionamento em regime permanente, levando em consideração que as ondas de tensão e corrente serão perfeitamente senoidais. Porém, cada vez mais os transformadores estão sendo alimentados por ondas de tensão com considerável distorção harmônica ou alimentam cargas geradoras de harmônicos de corrente. Isso gera conseqüências que vão desde ruído audível até elevadas perdas nos enrolamentos do transformador, o que causa sobreaquecimento do mesmo e conseqüentemente a diminuição da sua vida útil [22].

Harmônicos de tensão aumentam as perdas no seu núcleo enquanto que os harmônicos de corrente aumentam as perdas nos enrolamentos [23]. Quanto maior a frequência da corrente injetada no transformador, maiores serão as perdas, e, conseqüentemente, maior o aquecimento nos seus enrolamentos. Em [24] é apresentado um estudo quantificando a diminuição da vida útil de um transformador na presença de harmônicos e corrente contínua.

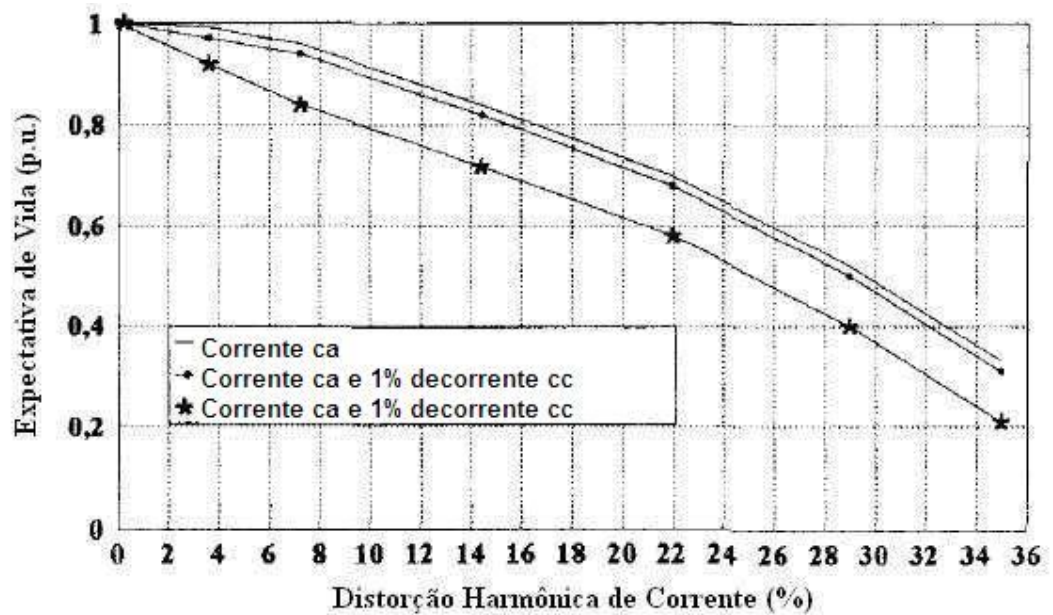


Figura 2.7 – Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de corrente

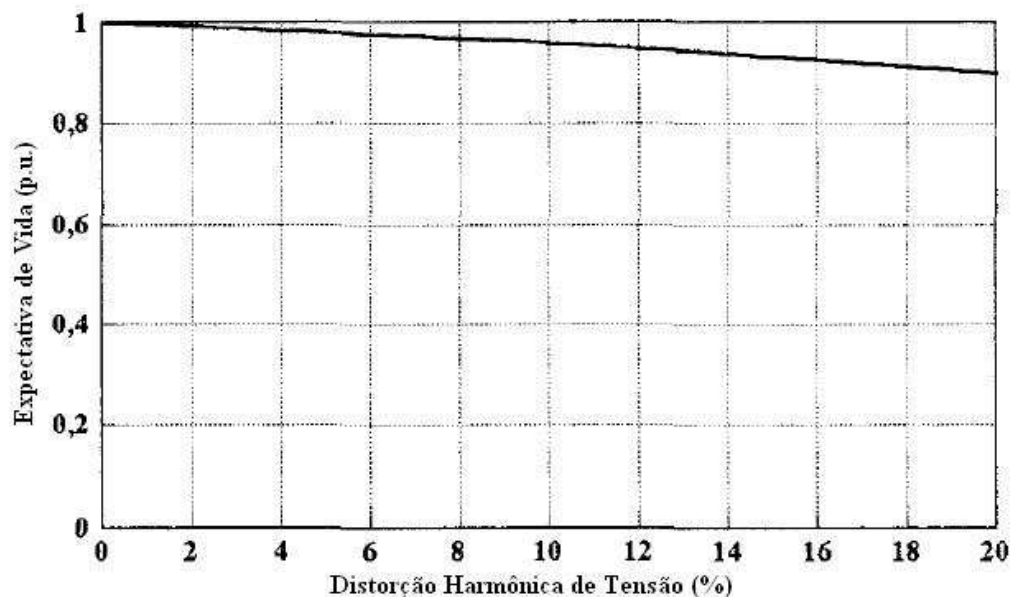


Figura 2.8 – Expectativa de vida dos transformadores com a presença de harmônica de tensão

Nota-se nas Figuras 2.7 e 2.8 que a perda de vida útil de um transformador é mais severa devido a uma elevada DHT_i do que devido a uma elevada DHT_v . Esta preocupação com a vida útil torna-se relevante pois é comum encontrarmos DHT_i da ordem de 10-30 % em diversas aplicações.

Normalmente, para evitar a diminuição da vida útil dos transformadores na presença de correntes harmônicas, é realizado um superdimensionamento do mesmo. Esse superdimensionamento é calculado a partir do fator K ou do F_{HF} , e é aconselhado para transformadores com distorção harmônica de corrente superior a 5 % [17].

2.3.3 Banco de capacitores

Os bancos de capacitores são equipamentos extremamente sensíveis à presença de harmônicos. Como a impedância dos capacitores diminui com o aumento da frequência, estes naturalmente funcionam como filtros de harmônicos, absorvendo parte da corrente harmônica para si. Essa passagem de corrente não prevista pode causar problemas de aquecimento, perda de vida útil e até explosões dos mesmos devido à ressonância paralela. Esta ressonância ocorre quando as reatâncias dos bancos de capacitores e as reatâncias do sistema (predominantemente indutivas) se equivalem em módulo em uma determinada frequência. A frequência na qual esse efeito ocorre é chamada frequência de ressonância paralela e é definida por:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1/(LC)} \quad (2.17)$$

Onde,

L = indutância equivalente do sistema

C = capacitância do banco de capacitores

Uma alternativa para se estimar a ordem do harmônico no qual o sistema é ressonante com um banco de capacitores, é calcular o harmônico a partir da potência de curto circuito da barra onde o banco de capacitores está ligado (MVAsc) e da potência reativa total do banco de capacitores (MVAr_{cap}). A ordem do harmônico ressonante (H_r) é dado por:

$$H_r = \sqrt{MVAsc / MVAr_{cap}} \quad (2.18)$$

A impedância resultante do paralelo dessas reatâncias, que são muito próximas em módulo (e contrárias em ângulo), gera um valor de impedância muito grande. Como as fontes de harmônicos podem ser modelados como fontes de corrente de valor fixo [30], a passagem dessa corrente harmônica em uma impedância elevada gera uma sobretensão harmônica elevada que pode danificar o banco de capacitores. De acordo com [27], os capacitores são afetados pelos harmônicos devido as três principais conseqüências da circulação destes nas barras onde o banco de capacitores está alocado:

- Aumento da tensão eficaz – A presença de harmônicos de tensão pode gerar aumento da tensão eficaz da barra e o seu valor de pico. Este ocasiona descargas parciais e deterioração do isolamento dos capacitores;
- Aumento da corrente nominal – Por sua vez, a presença de harmônicos de corrente pode gerar o aumento da corrente eficaz e o valor de pico da mesma. Este ocasiona sobre-aquecimentos localizados e instabilidades no comportamento dielétrico dos capacitores;
- Efeito combinado entre tensão e corrente – O comportamento não senoidal da tensão e corrente com variações bruscas gera também variações bruscas no campo elétrico interno entre as placas. Esta variação gera a deterioração das características dielétricas do capacitor.

Na Figura 2.9, apresentada em [27], está evidenciada a diminuição da vida útil de um capacitor quando submetido às sobretensões. É clara a grande sensibilidade do capacitor a este fenômeno.

Para se evitar a perda ou diminuição da vida útil do banco de capacitores é necessário que seja realizado um estudo prévio de ressonância no sistema onde o banco deve ser instalado para se garantir que a frequência de ressonância paralela não coincida com a frequência de um harmônico presente na rede, gerando uma sobretensão.

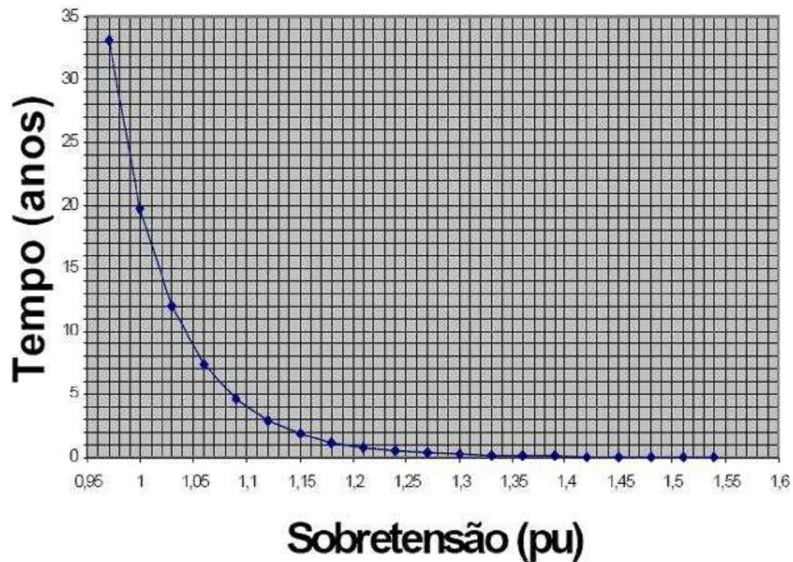


Fig. 2.9 – Diminuição da vida útil x sobretensão permanente em um capacitor

2.3.4 Sistemas de proteção

Os relés utilizados para a proteção do sistema elétrico podem ser influenciados pela presença de harmônicos na rede e gerar uma atuação indevida. Além disso, outros fatores como o tempo de atuação, corrente de partida e conjugado do relé também podem ser influenciados pela presença de harmônicos [21].

Relés eletromecânicos que dependem da passagem por zero ou pelo valor de pico da onda de tensão ou corrente no seu funcionamento podem atuar indevidamente, uma vez que a presença de harmônicos causa deformação da onda, podendo gerar mais passagens por zero em um ciclo ou variando o valor de pico da onda.

A presença de grande quantidade de corrente de 3º harmônico no neutro, por sua vez, pode também provocar a atuação da proteção de terra [20].

Felizmente, na maioria dos casos, atuações indevidas da proteção devido aos harmônicos só ocorrem em sistemas com distorções harmônicas de tensão extremamente elevadas, com DHTv da ordem de 15% [20].

2.3.5 Sistemas de comunicação

Problemas como interferência eletromagnética entre sistemas de comunicação e sistemas elétricos foram os primeiros atribuídos aos harmônicos. As conseqüências geradas por essa interferência vão desde um ruído irritante no sistema telefônico (quando a interferência é baixa) até a perda de informações em sistemas de transferência de dados, quando há alta interferência.

Essa interferência é danosa devido à baixa potência dos sinais envolvidos nos sistemas de comunicação (da ordem de miliwatts), ou seja, qualquer indução do sistema elétrico no sistema de comunicação pode causar níveis de ruídos inaceitáveis.

Uma vez que os sistemas telefônicos utilizam banda de voz de 300 a 3000 Hz [22], as induções causadas pelos harmônicos da rede elétrica são especialmente problemáticas.

2.4 Guias existentes sobre harmônicos e limites de tensão em regime permanente

Os Procedimentos de Rede em seu submódulo 2.8 estão contidos os critérios de distribuição de energia que englobam o nível máximo de distorção harmônica de tensão possível em um sistema brasileiro [26]. Os limites de DHTv foram determinados, agregando-se a experiência de diversos países e estudos harmônicos obtidos nos últimos anos por grandes empresas do sistema elétrico brasileiro.

Os principais guias internacionais vigentes e as referências nacionais são:

- Guia IEEE Std 519-1992 [13]
- Norma IEC 61000 [18]
- Procedimento de Rede – Submódulo 2.8 [26]

Cada um deles indica limites máximos de acordo com seus critérios. Abaixo são descritos resumidamente os limites estipulados por cada referência.

2.4.1 Guia IEEE Std 519-1992

Este guia determina os valores máximos de distorção harmônica individual de tensão e os valores de distorção harmônica total presentes em uma barra. Tais limites estão descritos na tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Limites de distorção de tensão [13]

Faixa de tensão	Distorção individual por harmônico (%)	Distorção total de tensão DHT_V (%)
$V \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV $< V < 161$ kV	1,5	2,5
$V \geq 161$ kV	1,0	1,5*

* Em sistemas de alta tensão, a DHT_V pode chegar a mais de 2% onde a causa desta distorção é a utilização de HVDC.

Em relação ao limite de distorção de corrente, o guia sugere valores máximos de harmônicos individuais em relação ao nível de tensão da carga. Um outro fator determinante para a obtenção dos limites de harmônicos individuais é a relação entre a corrente de curto circuito da barra ($I_{c.c.}$) e a corrente em demanda máxima da carga (I_{carga}). Quanto maior for $I_{c.c.}$ em relação a I_{carga} , maior será o valor máximo permitido do harmônico. O guia IEEE utiliza o DTD para quantificar a distorção de corrente. Os valores recomendados para os valores de DTD encontram-se na tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Limites de distorção de corrente (DTD) em relação à corrente fundamental

Nível de tensão	I_{CC}/I_{carga}	Harmônicos individuais					DTD (%)
		$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V \leq 69$ kV	< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
	$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
	$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
	$100 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
	> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20
69 kV $< V \leq 161$ kV	< 20	2	1	1,75	0,3	0,15	2,5
	$20 < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
	$50 < 100$	5	2,25	2	0,75	0,35	6
	$100 < 1000$	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
	> 1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
$V > 161$ kV	< 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
	≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares

2.4.2 Normas IEC da série 61000

As normas IEC da série 61000 são subdivididas em várias partes, sendo as principais:

- IEC 61000-2-2

Esta parte trata dos distúrbios conduzidos de baixa frequência e níveis harmônicos em redes de baixa tensão monofásicas e trifásicas com tensões nominais de 240 e 415V, respectivamente. Os limites apresentados são para tensões harmônicas individuais, sendo que o valor máximo destes harmônicos varia de acordo com a ordem do harmônico. Uma distorção harmônica total máxima também é apresentada. A tabela 2.9 apresenta os valores descritos.

- IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4

Estas definem os limites harmônicos de correntes de equipamentos ligados à rede de distribuição de baixa tensão. Seus propósitos são garantir que os harmônicos de corrente gerados e injetados na rede não sejam capazes de aumentar o nível da distorção harmônica de tensão nas barras do sistema além dos limites descritos na parte IEC 61000-2-2.

Tabela 2.9 – Limites de harmônicos individuais em sistema públicos de baixa tensão

Ordem ímpar	Tensão harmônica (%)	Ordem ímpar múltiplo de 3	Tensão harmônica (%)	Ordem par	Tensão harmônica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,2
19	1,5	-	-	12	0,2
23	1,5	-	-	>12	0,2
25	1,5	-	-	-	-
>25	$0,2 + 1,3 \times 25/h$	-	-	-	-
DHTv (até o 40º harmônico) = 8%					

A 61000-3-2 trata de equipamentos de menor potência, que drenam até 16 A por fase enquanto que a parte IEC 61000-3-4 trata de equipamentos com corrente por fase

maiores que 16 e menores que 75 A .Na 61000-3-2, os equipamentos são classificados em quatro categorias:

- Classe A – Equipamentos trifásicos equilibrados e qualquer outro equipamento não pertencente às classes B,C e D.
- Classe B – Equipamentos portáteis
- Classe C – Equipamentos de iluminação (incluindo “dimmerizados”)
- Classe D – Equipamentos com o formato da corrente de entrada incomum e com potência ativa inferior a 600 W.

Cada categoria possui um limite harmônico diferente. Os limites permitidos para equipamentos das classes A,C e D são apresentados nas tabelas 2.10, 2.11 e 2.12. Os limites da classe B são iguais aos da classe A multiplicados por um fator de 1,5.

Tabela 2.10 -Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe A

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (A)	Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	8-40	0,23 x 8/h
11	0,33	-	-
13	0,21	-	-
15-39	0,15 x 15/h	-	-

Tabela 2.11 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe C

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (%)*
2	2
3	30% x fator de potência
5	10
7	7
9	5
11-39	3

* Em relação à corrente fundamental

Tabela 2.12 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos classe D

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente	
	Por watt (mA/W)	(A)
2	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
15-39	3,86/h	2,25/h

Para os equipamentos com corrente superior a 16 A e menor que 75A, a parte IEC 61000-3-4 define os limites permitidos mostrados na tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Limites de correntes harmônicas para equipamentos com correntes entre 16 e 75 A

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (%) [±]	Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (%) [±]
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2,0	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

- IEC 61000-3-6

Esta parte trata dos níveis máximos de distorção de corrente devido aos equipamentos conectados às redes de média tensão (entre 1 e 35 kV - MT) e de alta tensão (entre 35 e 230 kV - AT). A tabela 2.14 apresenta os limites de harmônicos permitidos para os valores de tensão mencionados.

Tabela 2.14 – Limites de distorções harmônicas recomendadas pela norma IEC 61000-3-6.

Harmônicos ímpares não múltiplas de 3			Harmônicos ímpares múltiplas de 3			Harmônicos pares		
h	V _h %		h	V _h %		h	V _h %	
	MT	AT-EHV		MT	AT-EAT		MT	AT-EAT
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	> 21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				> 12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						
> 25	0,2 + 0,5 25/h	0,2 + 0,5 25/h	NOTA – DHT = 6,5 % para sistemas MT e de 3 % para sistemas AT, h é a ordem harmônica.					

2.4.3 Procedimento de rede - Submódulo 2.8

Os limites de tensão aceitos no Brasil e apresentados neste procedimento de rede são descritos a seguir.

- Limites de tensão

São apresentados os limites de Distorção Harmônica Total e Individual. O primeiro é utilizado para delimitar o nível de tensão em uma barra do sistema elétrico, não importando o número de consumidores ligados a ela. O segundo delimita o nível máximo de DHT que a tensão de entrada de um único consumidor pode apresentar. Esses limites estão apresentados na tabela 2.15 [26].

Para se determinar o valor de DHT de uma barra a ser comparada com os valores limites apresentados na tabela 2.15 é necessário se calcular o DHT de acordo com o critério exigido pelo Procedimento de Rede em seu submódulo 2.8:

1. Deve-se realizar a medição de DHT em uma barra no período de um dia (24h) e ao longo de sete dias consecutivos. O valor a ser utilizado é aquele que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de medição.
2. O valor do indicador corresponde ao maior valor encontrado comparando-se os sete maiores valores durante a semana (o maior valor de cada dia).

Tabela 2.15- Limites globais de harmônicos em relação à tensão fundamental [26]

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2	3, 5, 7	2	2, 4, 6	1
9, 11, 13	3			9, 11, 13	1,5		
15 a 25	2	≥ 8	1	15 a 25	1	≥ 8	0,5
≥ 27	1			≥ 27	0,5		
DHT _v = 6%				DHT _v = 3%			

- Limites de corrente

Os limites de correntes harmônicas são estabelecidos por cada concessionária através de análise de penetração harmônica em seu sistema. Sua análise não se preocupa diretamente com a distorção de corrente mas com o efeito da distorção de corrente na tensão.

2.4.4 Resumo das Referências

O IEEE é uma associação de classe que, a partir da experiência de profissionais da área, estabelece limites na injeção de harmônicos no sistema elétrico. Apesar de ser uma referência mundial, estes limites devem ser encarados como recomendação e não como uma norma a ser seguida.

O IEC, por outro lado, é um organismo de regulamentação internacional que estabelece valores máximos de injeção de harmônicos no sistema elétrico produzidos por equipamentos individuais. Na região onde estas normas estão em vigor, os equipamentos devem obedecer rigorosamente os limites impostos pelo IEC.

O Procedimento de Rede são documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS e aprovados pela ANEEL, que estabelecem os procedimentos e os requisitos necessários a realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, da administração da transmissão, da programação e operação em tempo real no âmbito do SIN. Nesta dissertação tratamos mais especificamente do submódulo 2.8 que trata do Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes. No Brasil, estes limites devem ser rigorosamente obedecidos.

2.4.5 Limites para as Variações de Tensão em Regime Permanente

Os valores de tensão em regime permanente devem atender aos requisitos que constam na resolução da ANEEL no 505/2001. A título de ilustração, as tabelas 2.17, 2.18 e 2.19 indicam os valores permitidos para as variações de tensão em regime permanente.

Tabela 2.17 – Valores permitidos para as variações de tensão nominal igual ou superior a 69kV.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,93 TC \leq TL \leq 0,95 TC$ ou $1,05 TC < TL \leq 1,07 TC$
Crítica	$TL < 0,93 TC$ ou $TL > 1,07$

Tabela 2.18 – Valores permitidos para as variações de tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL \leq 0,93 TC$
Crítica	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05$

Tabela 2.19 – Valores permitidos para as variações de tensão nominal igual ou inferior a 1kV.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231)/(116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233)/$ $(109 \leq TL < 116$ ou $133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189$ ou $TL > 233)/(TL < 109$ ou $TL > 140)$

2.5 Conclusões gerais

Neste capítulo foram apresentados os principais indicadores utilizados para estudos sobre distorções harmônicas. Também foram expostas as características harmônicas dos principais equipamentos geradores de harmônicos presentes nas indústrias e os efeitos destes em diversos equipamentos. São identificadas algumas referências sobre o estudo de harmônicos destacando-se a norma IEEE 519-1992 e os Procedimentos de Rede do ONS. É realizada uma comparação também entre estas referências e são apresentados os limites para variação de tensão em regime permanente. As informações apresentadas neste capítulo possibilitam que seja avaliada de forma criteriosa a injeção de harmônicos pela rede elétrica deste consumidor.

3. FILTROS DE HARMÔNICOS

3.1 Introdução

No capítulo anterior foi descrito como surgem os componentes harmônicos nos sistemas de potência, seus efeitos sobre os equipamentos e a legislação sobre os limites de injeção de harmônicos no sistema de potência .

É necessário focalizar, agora, as técnicas utilizadas para eliminar (ou pelo menos reduzir) os níveis de distorções harmônicas nos sistemas elétricos. Dentre essas técnicas, os filtros de harmônicos têm sido os mais utilizados, embora, devido à sua complexidade e custo elevado, idéias alternativas para eliminação harmônica estão sendo desenvolvidas, como por exemplo: eliminação por compensação do fluxo magnético; eliminação por injeção harmônica e eliminação por injeção de “ripple” c.c. [32]. Na instalação de conversores estáticos de grande potência, uma outra forma de redução harmônica é também muito utilizada, ou seja, o uso de conversores, com um elevado número de pulsos como visto no capítulo 2.

Os filtros são instalados no sistema com a finalidade de absorver os harmônicos de corrente, proporcionando um caminho de baixa impedância para esses harmônicos. Com isto, consegue-se o principal objetivo que é o de reduzir a amplitude de uma ou mais frequências de correntes e/ou tensões harmônicas. Além disto, os filtros de harmônicos, podem também compensar a energia reativa do sistema com a consequente melhoria do fator de potência da planta. Em outras palavras, utiliza-se na constituição dos filtros os bancos de capacitores normalmente empregados para correção do fator de potência, minimizando os investimentos necessários.

Este capítulo se inicia pela conceituação dos parâmetros envolvidos no dimensionamento de filtros de corrente alternada (de interesse nesse trabalho). Posteriormente, são apresentados os critérios de projetos, as configurações típicas e as propriedades dos componentes de filtros, com vista à sua especificação. Por fim, além de uma breve consideração sobre custos de filtros, é apresentado um exemplo completo de seu dimensionamento.

3.2 Tipos de Filtros

Os filtros, com relação a uma determinada carga, podem ser classificados pela sua localização, pelo modo de conexão ao sistema elétrico, pela largura de faixa de sintonia e pelo número e frequências de suas ressonâncias.

3.2.1 Localização

Os filtros podem ser instalados tanto do lado c.a. como do lado c.c. (no caso de conversores). Os filtros no lado c.a. podem ser conectados no lado primário (da rede) dos transformadores-retificadores, ou no enrolamento terciário, se houver.

A utilização dos filtros no enrolamento terciário tem a vantagem de um menor custo, pois são isolados para tensões mais baixas. No entanto, os transformadores com enrolamento terciário são mais caros. Além disso, esses enrolamentos têm normalmente uma alta reatância de dispersão, que ficando em série com os filtros “shunt”, dificultam a verificação de possíveis ressonâncias entre os filtros e a rede c.a..

3.2.2 Modos de Conexão

Existem dois tipos de filtros com relação ao modo de conexão ao sistema elétrico.

- Filtro série

Conforme ilustrado na Figura 3.1, o filtro é ligado em série com o sistema de forma a impedir a circulação de um determinado harmônico entre a carga e o sistema elétrico. Este filtro pode ser formado por uma indutância e capacitância em paralelo e representa uma grande impedância para a frequência que se deseja evitar.

Por ser ligado em série com o sistema, ele apresenta a desvantagem de ser dimensionado para suportar a corrente de plena carga do circuito e, portanto, é mais caro.

Além disso, a solução para eliminar harmônicos com filtros série não pode ser usada, porque a produção de harmônicos pelos componentes não-lineares do sistema (como transformadores e conversores estáticos) ocorre pela necessidade da circulação desses harmônicos para a sua operação normal.

- Filtro “shunt”

Conforme ilustrado na Figura 3.2, o filtro é ligado em paralelo com o sistema, de forma a propiciar um caminho de baixa impedância para as frequências harmônicas,

evitando com isso a sua penetração no resto do sistema. Na prática, é o filtro mais utilizado pela sua menor complexidade e menor custo. Este capítulo é todo dedicado ao filtro “shunt”.

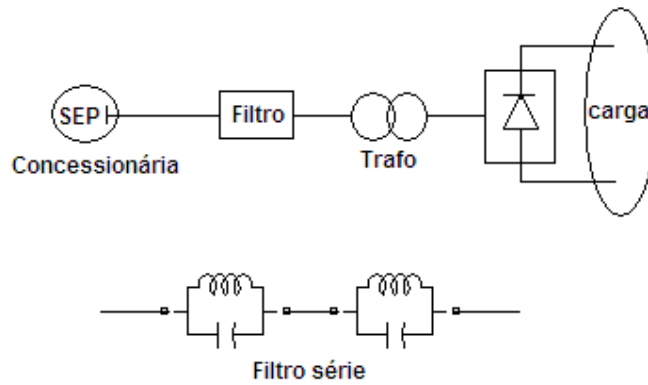


Figura 3.1 – Conexão e circuito típico de filtro série

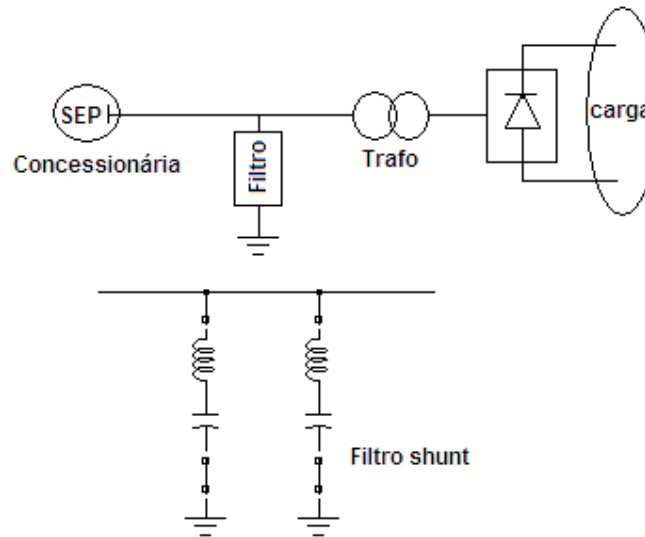


Figura 3.2 – Conexão e circuito típico de filtro shunt

O filtro “shunt”, em geral, é dimensionado para suportar somente a corrente harmônica para a qual está sintonizado somada a uma corrente fundamental muito menor que aquela do circuito principal. Portanto, o filtro “shunt” é bem mais barato que um filtro série da mesma eficácia.

Uma outra vantagem dos filtros “shunt” c.a., sobre os filtros série, é que na frequência fundamental os filtros “shunt” fornecem a potência reativa necessária para correção do fator de potência.

3.2.3 Largura da faixa de sintonia

Dois tipos de filtros são usados:

- O filtro sintonizado (filtro de alto Q), o qual é sintonizado em faixa bastante estreita para uma ou duas das frequências harmônicas mais baixas como a 5^a e 7^a, por exemplo.
- O filtro amortecido (filtro de baixo Q), o qual, se conectado “shunt”, oferece uma baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, por exemplo, a 17^a e harmônicos superiores. Este segundo tipo é também chamado filtro passa-alta. Esses filtros são analisados em maiores detalhes mais a frente.

3.3 Definições

3.3.1 Fator de qualidade

Um filtro “shunt” está sintonizado para uma determinada frequência, quando nesta frequência as reatâncias indutiva e capacitiva são iguais.

Portanto, deve ser introduzido o conceito de qualidade de um filtro, medido pelo fator Q, determinante da largura da faixa de sintonia do filtro.

Com relação ao fator de qualidade Q, os filtros podem ser do tipo de alto Q e de baixo Q.

Estão apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente, exemplos típicos de circuitos de filtros de alto e baixo Q e suas variações de impedância com a frequência. No caso de um filtro sintonizado, “Q” é definido como a relação entre a reatância indutiva (ou capacitiva) X_r na ressonância, e a resistência R, ou seja:

$$Q = X_r / R \quad (3.1)$$

Como pode ser visto na Figura 3.3, a banda passante (PB) no filtro sintonizado é definida como sendo a faixa de frequência na qual a impedância do filtro é igual ou inferior a $\sqrt{2}$ vezes a sua resistência equivalente na frequência de ressonância. O fator de qualidade e a banda passante são relacionados pela expressão:

$$Q = \omega_h / PB \quad (3.2)$$

onde ω_h é a frequência angular sintonizada em radianos/segundo (frequência de

ressonância).

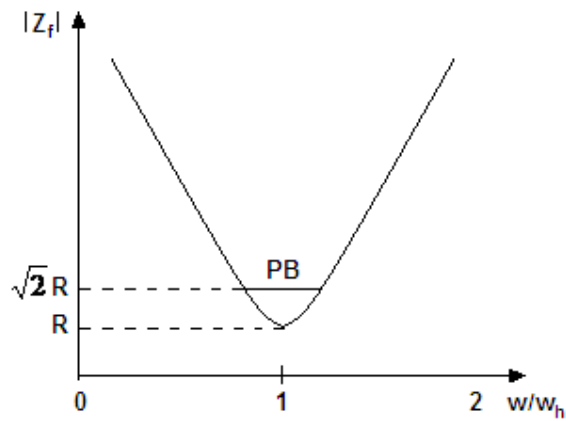


Figura 3.3 – Filtro shunt sintonizado simples (alto Q)

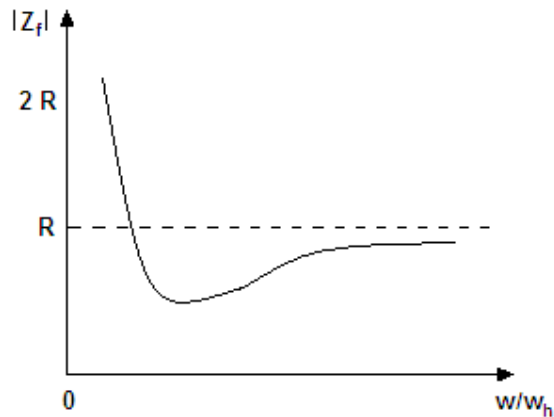


Figura 3.4 – Filtro shunt amortecido de 2ª ordem (baixo Q)

Nos filtros amortecidos passa-alta, o fator de qualidade Q é inverso daquele do filtro sintonizado, ou seja:

$$Q = R/X_h \quad (3.3)$$

3.3.2 Fator de Dessintonia

Na prática, um filtro não está sempre sintonizado exatamente na frequência harmônica para a qual ele é projetado para suprimir.

Define-se um fator para avaliar o grau de dessintonização do filtro, isto é, de quanto o filtro poderá operar fora da frequência nominal sintonizada. Este fator inclui vários efeitos que ocorrem comumente, tais como:

- Variações na frequência fundamental da fonte que causam deslocamentos das frequências harmônicas na mesma proporção;
- Variações na capacitância do capacitor e na indutância do reator do filtro, causadas pelo envelhecimento e temperatura;
- Desvio de sintonia na montagem causado pelas tolerâncias de fabricação dos reatores e capacitores.

A dessintonia total, em p.u. da frequência sintonizada nominal ω_h é

$$\delta = \frac{\omega - \omega_h}{\omega_h} \quad (3.4)$$

Além disso, segundo [5], uma mudança de L ou C de 2% causa a mesma dessintonização causada por uma variação de 1% na frequência do sistema. Por isso, δ é normalmente expresso como:

$$\delta = \left(\frac{\Delta f}{f_h} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_h} + \frac{\Delta C}{C_h} \right) \quad (3.5)$$

3.4 Projeto de Filtros Sintonizados

3.4.1 Filtros sintonizados simples

Um filtro sintonizado simples é um circuito série RLC, sintonizado na frequência de um harmônico (geralmente um harmônico característico mais baixo). Sua impedância é dada por:

$$Z_{hf} = R + j(\omega_h L - \frac{1}{\omega_h C}) \quad (3.6)$$

a qual, na frequência de ressonância (f_h), se reduz a R. Sua faixa de passagem é normalmente considerada como situada entre os limites de frequências onde $|Z_{hf}| = \sqrt{2} R$. Nessas frequências a reatância resultante é igual à resistência e, o ângulo da impedância é de $\pm 45^\circ$.

Existem, pois, dois parâmetros básicos de projeto a serem considerados antes da seleção de R, L e C: o fator de qualidade Q e δ o desvio relativo de frequência ou fator de

dessintonia.

Com o objetivo de expressar a impedância do filtro em termos de Q, as seguintes relações se aplicam:

- frequência angular sintonizada W_h (rad / seg):

$$W_h L = 1/W_h C \therefore W_h = 1/\sqrt{LC} \quad (3.7)$$

- frequência angular deslocada W (rad / seg):

$$W = W_h (1 + \delta) \quad (3.8)$$

- reatância do reator ou capacitor na frequência sintonizada (X_h) (ohms)

$$X_h = W_h L = 1/(W_h C) \therefore X_h = (1/\sqrt{LC}) \cdot L \therefore X_h = \sqrt{L/C} \quad (3.9)$$

- fator de qualidade do reator Q (adimensional):

$$Q = X_h/R \quad (3.10)$$

- capacitância do capacitor:

$$C = 1/(W_h X_h) = 1/(W_h RQ) \quad (3.11)$$

- indutância do reator:

$$L = X_h/W_h = RQ/W_h \quad (3.12)$$

Substituindo as equações 3.8, 3.11 e 3.12 na equação 3.6, obtém-se:

$$Z_{hf} = R \left\{ 1 + jQ \delta \left[\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right] \right\} \quad (3.13)$$

Considerando que δ é bem pequeno ($\delta \ll 1$), a equação 3.13 pode ser simplificada para:

$$Z_{hf} \cong R(1 + j2 \delta Q) = X_h (Q^{-1} + j2 \delta) \quad (3.14)$$

sendo

$$Z_{hf} \cong R \sqrt{1 + 4 \delta^2 Q^2} \quad (3.15)$$

Em geral, é mais conveniente lidar com admitâncias no projeto de filtros em vez de impedâncias, ou seja:

$$Y_{hf} \cong 1/Z_{hf} = 1/[R(1 + j2 \delta Q)] = G_{hf} + jB_{hf} \quad (3.16)$$

onde

$$G_{hf} = Q/[X_h (1 + 4 \delta^2 Q^2)] \quad (\text{condutância}) \quad (3.17)$$

$$B_{hf} = -\frac{2\delta Q^2}{[X_h(1 + 4\delta^2 Q^2)]} \text{ (susceptância)} \quad (3.18)$$

$$|V_h| = \left| \frac{I_h}{Y_h} \right| = \left| \frac{I_h}{(Y_{hf} + Y_{hr})} \right| \quad (3.19)$$

onde I_h é suposta conhecida;

$Y_{hf} = 1/Z_{hf}$ (admitância do filtro para harmônico de ordem h);

$Y_{hr} = 1/Z_{hr}$ (admitância da rede para harmônico de ordem h).

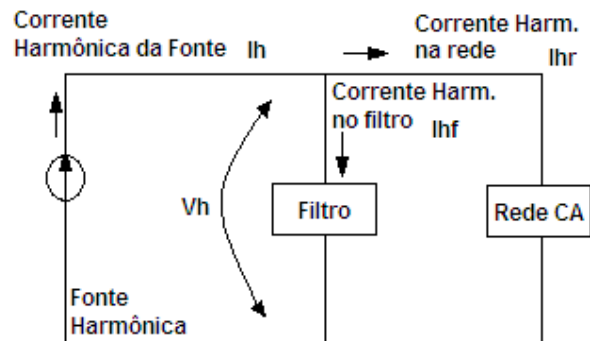


Figura 3.5 – Circuito para computação da Distorção Harmônica de Tensão

Com relação às equações 3.16 a 3.19, devem ser feitas as seguintes observações:

- para minimizar a distorção de tensão (V_h) é necessário aumentar a admitância total do filtro (Y_{hf});
- para a previsão dos maiores níveis possíveis de distorção, é necessário escolher de forma pessimista as variáveis que não são precisamente conhecidas, tais como o desvio de frequência e a admitância da rede Y_{hr} ;
- desta forma, desde que a distorção de tensão aumente com o crescimento de δ e, com a redução na admitância da rede Y_{hr} , deve ser usado na análise o maior desvio esperado δ máx., assim como, a mais baixa admitância do sistema;
- o projetista pode decidir, dentro de certos limites, sobre os valores de Q e tamanho do filtro (VA nominais na frequência fundamental).

Em termos de Q e δ a equação 3.19 pode ser escrita como:

$$|V_h| = |I_h| \left\{ \left[G_{hr} + \frac{1}{(R + 4RQ^2\delta^2)} \right]^2 + \left[B_{hr} - \frac{2Q\delta}{(R + 4RQ^2\delta^2)} \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (3.20)$$

Demonstra-se que a admitância da rede (Y_{hr}), para a máxima distorção $|V_h|$ é:

$$|V_{hr}| = \frac{[\cos\varphi_{hr} (2Q\delta \tan\varphi_{hr} - 1)]}{[R(1 + 4Q^2 \delta^2)]} \quad (3.21)$$

dando

$$|V_h| = I_h W_h L \left\{ \frac{[1 + 4Q^2 \delta^2]}{[Q(\sin\varphi_{hr} + 2Q\delta \cos\varphi_{hr})]} \right\} \quad (3.22)$$

sendo φ_{hr} o ângulo de fase de impedância da rede na frequência de ordem h.

Há um Q ótimo, o qual resulta na mais baixa tensão harmônica, ou seja:

$$Q_0 = \frac{(1 + \cos\varphi_{hr})}{(2 \delta \max \cdot \sin\varphi_{hr})} \quad (3.23)$$

e

$$|V_h| = I_h \delta \max \cdot W_h L \left[\frac{4}{(1 + \cos\varphi_{hr})} \right] = 2I_h R / \sin\varphi_{hr} \quad (3.24)$$

Com relação às equações 3.20 a 3.24, são válidos os seguintes comentários:

- segundo [34], freqüentemente se usa no projeto de filtros a suposição de admitância da rede c.a. como sendo puramente indutiva. Geralmente as impedâncias harmônicas podem ser circunscritas em uma parte do plano R, jX (lugar geométrico de impedâncias) e, o ângulo de fase máximo (φ_{hr}) da impedância da rede pode, portanto, ser limitado para valores menores que 90° e, geralmente, decresce com o aumento da frequência;
- normalmente os filtros não são projetados para dar tensão harmônica mínima sob as condições das equações 3.23 e 3.24. Em geral, um fator Q mais alto é selecionado, com o objetivo de redução de perdas;
- por outro lado, segundo [32], para os filtros sintonizados, embora um fator de qualidade elevado signifique baixas perdas e boa seletividade, este não pode ser exageradamente elevado, já que isto implicaria em um sistema muito pouco amortecido, podendo causar oscilações proibitivas durante os transitórios oriundos das operações de manobra dos filtros. Além disso, há necessidade de considerar que a frequência do sistema não é constante, apresentando oscilações que poderão dessintonizar os filtros, caso estes se apresentem exageradamente sintonizados (fator Q muito elevado);
- uma solução gráfica alternativa é feita por [35] para explicar a seleção do Q ótimo, ou seja, o valor que maximiza Y_h ;

- uma condição que também tem sido considerada no projeto de filtros e que pode restringir, por exemplo a operação de conversores, é a saída de operação de um ou mais ramos do filtro. Os ramos do filtro que continuam operando poderão ser sobrecarregados, pois eles terão que absorver a corrente harmônica total gerada pelo conversor;
- a tabela mostra o efeito da limitação do ângulo da impedância da rede para $\pm \varphi_{hr}$ sobre o Q ótimo e sobre a tensão harmônica garantida máxima V_h .

Tabela 3.1 – Efeito da limitação do ângulo da impedância da rede sobre o Q ótimo e sobre a tensão harmônica máxima V_h .

φ_{hr}	0	15	30	45	60	75	80	85	90
$\delta.Q_0$		3,80	1,87	1,21	0,87	0,65	0,60	0,55	0,50
$V_h / \delta X_h I_h$	2,0	2,03	2,14	2,35	2,67	3,17	3,41	3,68	4,00

3.4.2 Efeito da impedância da rede na filtragem

Como a impedância da rede para os harmônicos está sujeita a mudanças e, geralmente, não é conhecida com precisão, os efeitos de algumas suposições extremas são analisadas por [31]:

1. Se a impedância da rede for zero, para todos os harmônicos, então $V_h = 0$ e $I_{hr} = I_h$. Filtros sintonizados não têm, pois, nenhum efeito. Todas as correntes harmônicas geradas pela fonte harmônica penetram na rede. A filtragem parece perfeita se avaliada pela tensão mas, de má qualidade se avaliada pela corrente. Esta suposição de $Z_{hr} = 0$ não é real. Se ela for aproximadamente verdadeira, filtros com elementos série devem ser escolhidos;
2. Se a impedância da rede for infinita, todas as correntes harmônicas geradas pela fonte passam através dos filtros. Neste caso ter-se-á $I_{hr} = 0$, $I_{hf} = I_h$ e $V_h = Z_{hf} \times I_h$. A filtragem é perfeita se avaliada pela corrente e pode ser boa se avaliada pela tensão e, o projeto de filtros adequados não apresenta nenhum grande problema. Esta suposição de $Z_{hr} = \infty$, embora não verdadeira, pode dar resultados razoáveis quanto a tensões harmônicas;
3. Há, entretanto, uma suposição mais pessimista: é de que o filtro e a rede estejam em ressonância paralela. A impedância resultante é uma resistência de valor elevado resultando em valores elevados para a tensão nos terminais do filtro e as correntes no

filtro e na rede. De fato, a corrente e tensão harmônica da rede podem ser aumentadas pela presença do filtro. A filtragem pode ser danosa se avaliada pela corrente, ou pela tensão, ou ambas. Além disso, o filtro pode ser sobrecarregado, isto é, com seus elementos sujeitos a correntes e tensões elevadas.

Como os filtros sintonizados são normalmente projetados para os harmônicos característicos mais baixos e a impedância de cada filtro, na frequência para a qual ele está sintonizado, é uma resistência de baixo valor, uma ressonância paralela severa entre o filtro e a rede para tais harmônicos é pouco provável de ocorrer. Excetuam-se os casos em que a faixa de passagem do filtro é estreita, ou a frequência do sistema é irregular, ou o filtro é dessintonizado. Da mesma forma, ressonância paralela é pouco provável nas frequências mais altas, para as quais o filtro amortecido passa-alta fornece uma baixa impedância. Esta ressonância ocorre geralmente próximo de harmônicos não característicos de baixa ordem. Dependendo da complexidade do sistema elétrico, esta ressonância pode ocorrer em mais de um harmônico não característico. Alterações na rede elétrica podem alterar estas frequências de ressonância.

Para frequências abaixo da frequência de sintonia do filtro, este apresenta uma impedância capacitiva. Portanto, quando os sistemas apresentam alguma ressonância de baixa frequência (2ª a 7ª h), a introdução de filtros nestas frequências irá simplesmente deslocar para a esquerda a ressonância, visto que a impedância do sistema por ser normalmente indutiva para baixas frequências, sempre entra em ressonância com a zona capacitiva da curva de resposta de frequência do filtro. É, portanto, extremamente importante verificar se não se deslocou a ressonância para alguma frequência harmônica 'perigosa'.

A severidade da ressonância depende da capacidade de amortecimento nos filtros e na rede. Portanto, algum conhecimento da resposta da rede para harmônicos é desejável.

3.4.3 Impedância da rede c.a. (Z_{hr})

A impedância da rede c.a. vista dos terminais da fonte harmônica, como uma função da frequência, pode ser medida ou calculada. Ambos os métodos oferecem certas dificuldades.

- Medição: as medições devem ser feitas com o sistema de potência em operação. Como a rede c.a. contém outras fontes de harmônicos, as medições da impedância da rede nas frequências harmônicas, requerem uma fonte de harmônicos de alta

potência. As medições se aplicam somente para as condições existentes no instante da medição e não para as condições futuras sob as quais um conversor possa operar. No entanto, as medições dão alguma informação útil que não pode ser obtida por processamento computacional;

- Cálculo: os cálculos podem ser obtidos ou por um modelo analógico (analisador de rede), ou por um computador digital. As simulações são feitas para condições de cargas leves e pesada e para saídas de linhas ou equipamentos e incluem também o planejamento das condições futuras.

Os principais problemas decorrem da falta de conhecimento adequado dos parâmetros dos circuitos nas frequências harmônicas e ao efeito do desbalanceamento dos mesmos.

As seguintes sugestões são apresentadas por [35] para representação do sistema de potência:

- Representar somente a rede de seqüência positiva;
- As linhas aéreas de transmissão podem ser representadas por uma seção equivalente, cujos ramos são corrigidos para cada frequência;
- Os transformadores podem ser representados por uma indutância de dispersão colocada em série com uma resistência, que é uma função de frequência. Suas capacitâncias são desprezadas;
- Geradores são representados por uma indutância com valor entre 0,8 e 0,9 p.u. de suas indutâncias subtransitórias;
- As cargas podem ser representadas por resistências.

3.5 Projeto de Filtros Amortecidos Passa-alta

O filtro amortecido oferece as seguintes vantagens:

1. Seu desempenho e carregamento é menos sensível à variação de temperatura, desvio de frequência, tolerâncias na fabricação de componentes e perda de elementos do capacitor, etc.
2. O filtro fornece uma baixa impedância para um largo espectro de harmônicos, sem a necessidade de subdivisão de ramos paralelos com aumento de chaveamento e problemas de manutenção;

3. O uso de filtros sintonizados muitas vezes resulta em ressonância paralela entre o filtro e admitâncias do sistema, na frequência harmônica abaixo da mais baixa frequência do filtro sintonizado, ou entre frequências de filtro sintonizado. Em tais casos o uso de um ou mais filtros amortecidos é uma alternativa mais viável.

As principais desvantagens do filtro amortecido são as seguintes:

1. Para conseguir um nível de desempenho de filtragem similar ao sintonizado, o filtro amortecido necessita ser planejado para uma maior capacidade em VA fundamental, embora, em muitos casos, um bom desempenho possa ser conseguido entre os limites requeridos para correção do fator de potência;
2. As perdas no resistor e reator são, geralmente, maiores.

3.5.1 Tipos de filtros amortecidos

Quatro tipos de filtros amortecidos são mostrados na Figura 3.7.

- O filtro de 1^a ordem não é normalmente usado, pois ele requer um grande capacitor e apresenta perda elevada na frequência fundamental;
- O filtro de 2^a ordem apresenta o melhor desempenho de filtragem, mas tem maiores perdas na frequência fundamental que o filtro de 3^a ordem. Este filtro pode muitas vezes ser obtido somente com o capacitor e o reator, incorporando-se R a L, respeitados os limites práticos relativos ao fator de qualidade do reator (às vezes $Q = 20$ ou 25 é possível).
- A principal vantagem do filtro de 3^a em relação ao filtro de 2^a ordem é uma significativa redução de perdas na frequência fundamental, devido ao aumento da impedância nesta frequência, causado pela presença do capacitor C2. Além disso, a capacitância de C2 é muito pequena comparada com C1;
- O desempenho de filtragem do filtro tipo C se encontra entre os filtros de 2^a e 3^a ordem. Sua principal vantagem é uma considerável redução de perdas na frequência fundamental desde que C2 e L tenham sintonização série nesta frequência. Este filtro é mais susceptível a desvios na frequência fundamental e variações nos valores dos componentes.

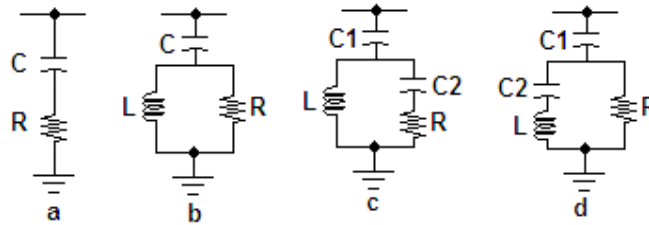


Figura 3.7 – Filtros amortecidos passa-alta: a) de 1ª ordem, b) de 2ª ordem, c) de 3ª ordem, d) Tipo C.

3.5.2 Impedância

No projeto de um filtro amortecido o Q é escolhido para dar a melhor característica sobre a faixa de frequências requerida sem se preocupar, no entanto, com nenhum Q ótimo como nos filtros sintonizados.

Para um filtro de 2ª ordem a impedância é

$$Z_{2^a} = 1/j\omega C + \left(1/R + 1/j\omega L\right)^{-1} \quad (3.25)$$

Generalizando, as seguintes definições se aplicam além daquelas já mostradas para filtros sintonizados:

$$f' = \omega/\omega_r = f/f_r \quad (3.26)$$

$$Q = R/X_r \quad (3.27)$$

$$Z' = Z/X_r \quad (3.28)$$

Deve ser enfatizado, que para o filtro amortecido, Q é definido como recíproco do Q para o filtro sintonizado.

Além disso, no circuito série RLC, uma melhor sintonia é alcançada com uma resistência mais baixa, enquanto no filtro passa-alta de 2ª ordem, ela é conseguida com uma resistência mais alta (resistor em paralelo com o reator).

Em termos de f' e Q a impedância de um filtro de 2ª ordem torna-se:

$$Z_{2^a} = 1/jf' + \left(1/Q + 1/jf'\right)^{-1} \quad (3.29)$$

3.6 Propriedades dos Componentes dos Filtros

Os capacitores, reatores e resistores devem ser dimensionados para as condições mais severas esperadas, com o objetivo de se prevenir possíveis danos a esses componentes. Por isso devem ser considerados: a tensão fundamental máxima, o desvio de frequência máximo, as correntes harmônicas de outras fontes e possíveis ressonâncias entre o filtro e o sistema c.a.. Com o conhecimento desses componentes, calculam-se as potências ativa e reativa e as perdas.

3.6.1 Capacitores

Os capacitores são compostos de unidades padronizadas as quais são conectadas em série e/ou paralelo, para obtenção da tensão total desejada e kVA nominal.

As principais características de capacitores são as seguintes:

- potência reativa por unidade de volume;
- perdas;
- custo.

Para a especificação dos bancos de capacitores são necessários:

- Potência nominal dos capacitores (kVAr);
- Tensão nominal (V);
- Frequência nominal (Hz);
- Capacitância nominal (μF);
- Classe de isolamento (kV);
- Nível Básico de Isolamento (kV);
- Categoria de temperatura ($^{\circ}\text{C}$);
- Tolerância (%) (variação permissível de capacitância);
- Tipo de dielétrico e meio isolante dos capacitores.

Os capacitores obtêm sua máxima potência reativa por unidade de volume operando com baixas perdas ou com altas sobretensões. Esta última situação deve ser evitada para prevenir-se a destruição térmica do dielétrico.

A capacidade de potência reativa requerida do capacitor é a soma das potências reativas em cada uma das frequências para a qual ele está sujeito.

3.6.2 Reatores

Os reatores de filtros são melhor projetados com núcleos não magnéticos. Nos casos de núcleos de ferro, há a desvantagem do acréscimo de perdas por histerese e dessintonia causada pela não-linearidade magnética.

A indutância em geral tem valor fixo. O fator de qualidade Q na frequência harmônica predominante pode ser escolhido de modo a reduzir os custos e está geralmente entre 50 e 150. Entretanto, valores de Q mais baixos são normalmente requeridos e sua obtenção é feita através da colocação de um resistor série com o reator.

As características nominais de reatores (e o seu custo) dependem principalmente da máxima corrente eficaz e do nível de isolamento requerido para resistir aos surtos de manobra. O nível de isolamento requerido pode ser bastante reduzido, o que implica em redução de custo, protegendo-se o reator através de um pára-raio adequado.

Especificação dos componentes:

Para a especificação de reatores de núcleo de ar são necessários, no mínimo, os seguintes dados:

- Indutância nominal do reator – 60Hz (mH);
- “Taps” necessários;
- Corrente nominal (frequência fundamental) (A rms) e Correntes harmônicas;
- Correntes de curto-circuito térmica e dinâmica (kA rms);
- Fator de qualidade (X/R);
- Frequência da rede e frequência harmônica;
- Tensão nominal (kV);
- Nível Básico de Isolamento (kV);

OBS.: A especificação dos *taps* para o ajuste de sintonização dos filtros deve ser limitada a $\pm 5\%$, valores estes que atendem com segurança as necessidades de correntes das tolerâncias de fabricação dos elementos de filtros.

Normas Aplicativas:

- ABNT-NBR 5119: Reatores para sistemas de potência-Especificação
- ABNT-NBR 7569: Reatores para sistemas de potência-Método de Ensaio
- IEC 289 – Reactors.

Para a especificação dos resistores de potência são necessários:

- Resistência nominal (ohms);
- Tolerância no valor da resistência ($\pm 5\%$);
- Corrente nominal com harmônicos incluídos (A rms);
- Tensão nominal (kV);
- NBI (kV);
- Instalação abrigada ou ao tempo.

3.7 Critérios Práticos de Projeto de Filtros

3.7.1 Potência e configuração típica dos filtros

A potência de um filtro é definida como sendo a potência reativa que o filtro supre na frequência fundamental, sendo igual a potência reativa fundamental fornecida pelos capacitores.

O dimensionamento dos elementos do filtro, entretanto, tem que considerar as potências reativas, a frequência fundamental e a frequência harmônica para a qual o filtro foi projetado.

Os filtros de harmônicos, em geral, são formados por uma combinação híbrida de:

- Filtros sintonizados: Para cada uma das frequências mais baixas como, por exemplo, a 5^a, 7^a, 11^a ou 13^a ordem. Esses harmônicos de ordem mais baixa possuem, em geral, maiores amplitudes e, em consequência, é mais barato utilizar filtros sintonizados para cada um desses harmônicos, do que utilizar-se um único filtro de faixa larga para filtragem de todos os harmônicos. Como visto, esses filtros possuem um fator Q mais alto de valor típico entre 20 e 60.
- Um único filtro amortecido: Um filtro do tipo passa-alta, faixa larga, para filtragem de todos os harmônicos superiores como por exemplo, acima da 17^a ordem. Os harmônicos superiores possuem, em geral, baixas amplitudes e, neste caso, esta é a solução mais econômica. Esse filtro de baixo Q, apresenta tipicamente valores de Q na região de 0,5 a 5.
- Um filtro anti-ressonante: Este filtro sintonizado na frequência de ressonância entre o sistema e a capacitância do banco de capacitores, para correção do fator de potência. A frequência de ressonância é:

$$W_r L_s = 1/(W_r C) \quad \therefore \quad W_r = 1/\sqrt{L_s C} \quad (3.30)$$

ou

$$\omega_r = \omega \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (3.31)$$

onde:

W = frequência angular da rede (rads/seg)

Q_c = potência do banco de capacitores (MVar)

S_{cc} = potência de curto-circuito do sistema (MVA)

Por exemplo, com $P_{cc} = 100$ MVA e a potência do banco $Q = 4$ MVar, há amplificação para o 5º harmônico.

Nota-se pela equação 3.31 que a frequência de ressonância com o sistema, para o qual o filtro anti-ressonante está sintonizado, varia à medida que o nível de curto-circuito do sistema aumenta. Por isso este filtro não pode ter um fator de qualidade alto. Um limite prático neste caso é $Q \leq 10$. (Isto faz com que o filtro possua uma faixa mais larga de modo a absorver as variações crescentes da P_{cc}).

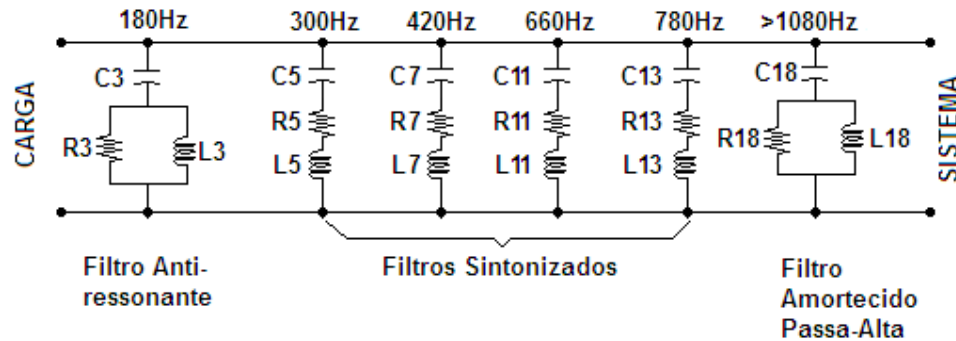


Figura 3.8 – Configuração típica de um filtro c.a.

O conjunto de filtros apresentado na figura 3.8 é típico para grandes sistemas industriais, com harmônicos gerados num amplo espectro de frequências e com grandes amplitudes.

Para pequenos e médios sistemas industriais, cada caso é diferente, e não há regra típica que se possa estabelecer.

O filtro instalado deve ter, em cada ramo, a seguinte estrutura:

- uma capacitância C_h , parte da capacitância total C;
- um reator sintonizado com C_h na frequência de ressonância ω_h ;
- um resistor com a função de garantir ao filtro um fator de qualidade adequado.

3.7.2 Conexão e dimensionamento dos componentes dos filtros

Os filtros podem ser conectados em triângulos (Δ), mas esta conexão não oferece nenhuma vantagem; portanto, em geral, é usada a conexão estrela (Y) com neutro aterrado como apresentado na Figura 3.9.

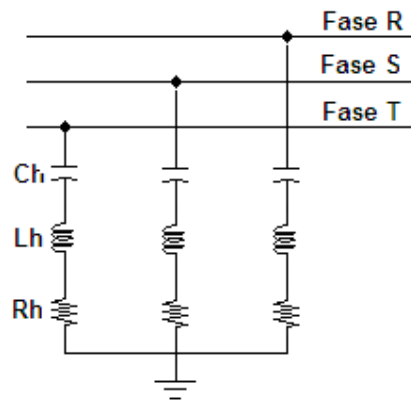


Figura 3.9 – Ramo de um filtro CA ligado em estrela.

Para evitar danos aos componentes, eles devem ser dimensionados para as piores condições operacionais:

- tensão do sistema máximo, 10% acima da nominal;
- desvio de frequência, máximo, $\pm 5\%$;
- corrente harmônica mais alta, causada pela ressonância do respectivo ramo do filtro com a rede e os outros ramos do filtro.

As correntes harmônicas de outras fontes, além do conversor em questão, devem ser consideradas; entretanto, a experiência tem mostrado que para conversores de alta potência com altas amplitudes harmônicas, elas podem ser desprezadas.

As tolerâncias de fabricação de reatores e capacitores são de 2 a 3%. A sintonia final dos filtros sintonizados deve ser feita depois da instalação. A capacitância pode ser variada em pequenos degraus, mudando o número de unidades em paralelo no banco mais próximo à terra.

3.7.3 Fator de Potência

Baixos valores de fator de potência são decorrentes de quantidades elevadas de energia reativa. Essa condição resulta em aumento na corrente total que circula nas redes de distribuição de energia elétrica da Concessionária e das unidades consumidoras, podendo sobrecarregar as subestações, as linhas de transmissão e distribuição, prejudicando a estabilidade e as condições de aproveitamento dos sistemas elétricos, trazendo inconvenientes diversos, tais como:

- Perdas na rede;
- Quedas de tensão;
- Sub utilização da capacidade instalada;

O projeto do banco de capacitores dos filtros está ligado ao fator de potência da instalação. O que se deseja é que o fator de potência seja maior que 0,92. Quando a instalação opera abaixo deste valor ela é penalizada com multas.

Um dos problemas que podem aparecer na instalação de tais bancos de capacitores é a ressonância do mesmo com a indutância da rede elétrica. Apesar do banco de capacitores corrigir o fator de potência deve ser avaliado o efeito da inserção dos mesmos na instalação elétrica.

3.7.4 Proteção de Filtros

- Reatores

A divisão de tensão em um filtro sintonizado ocorre da seguinte forma:

1. A tensão na frequência fundamental da rede aparece quase totalmente sobre o capacitor;
2. A tensão harmônica aparece tanto no capacitor quanto no reator, sendo predominante neste último;
3. Tensões de surto aparecem quase totalmente através do reator. Por isso, deve-se proteger o reator com a colocação de pára-raios em paralelo, reduzindo o custo do componente, já que o custo de um reator depende muito do seu nível de isolamento. Para filtros amortecidos, o raciocínio é o mesmo. A tensão fundamental através desses reatores é tão baixa que pára-raios mais simples ou centelhadores podem ser usados.

A proteção contra surtos, em geral, é feita somente em alta tensão. Em sistemas

industriais em média tensão isto não é necessário.

- Resistores

O resistor em um filtro passa-alta de qualquer ordem deve suportar o mesmo surto de tensão do reator e pode ser protegido pelo mesmo pára-raio ou centelhador. Em filtros sintonizados, o pára-raio pode ser ligado através da combinação série do resistor e reator (PRR).

- Capacitores

Os capacitores não necessitam de proteção contra sobretensão, além daquela (PRS) já prevista para o circuito principal, onde os filtros e capacitores “shunt” estão ligados. A proteção contra curtos-circuitos nas unidades individuais é feita por fusíveis (F). Existem capacitores com fusíveis incorporados internamente que podem ser uma alternativa à configuração mostrada na Figura 3.10.

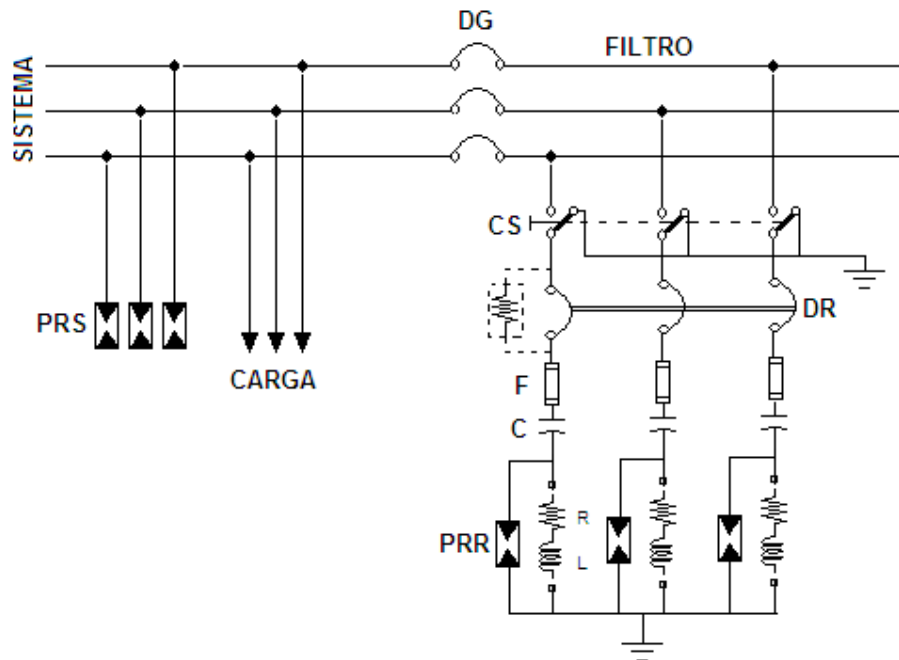


Figura 3.10 – Sistema de proteção de filtros.

Em que,

PRS = pára-raios do sistema;

DG = disjuntor geral do filtro;

CS = chave seccionadora com aterramento;

DR = disjuntor com resistores de pré-inserção (reduz sobretensões de energização dos filtros);

F = fusíveis para cada unidade de capacitor;

PRR = pára-raios ou centelhador dos reatores/resistores.

3.7.5 Custo de filtros

O custo do investimento de filtros c.a. está na faixa de 5 a 15% do custo do equipamento terminal (o conversor, por exemplo). Este custo é suficientemente alto para justificar um rigoroso cuidado no projeto, do ponto de vista técnico-econômico. O custo de perdas deve também ser levado em consideração, assim como o custo de filtros deve considerar a composição do custo para fornecer a potência reativa mais o custo para filtragem, não havendo uma divisão lógica entre eles.

O filtro mínimo é aquele que elimina harmônicos adequadamente com mínimo custo e fornece alguma potência reativa, porém, não a total necessária.

Um filtro sintonizado de custo mínimo tem seu custo variável com o tamanho do filtro, como mostrado na Figura 3.11 [36]. A curva de custo total é atribuída à presença de dois componentes de custo, um proporcional ao tamanho (S) e o outro inversamente proporcional a S :

$$k = AS + B/S \quad (3.32)$$

Em que:

k = custo total (US\$);

S = tamanho (MVar);

A, B = constantes (US\$/MVar e US\$.MVar, respectivamente)

Finalmente, é bom salientar que 60% do custo do investimento em filtros é dos capacitores, o que implica em economia substancial se eles forem escolhidos adequadamente.

No Brasil, o custo dos capacitores está em torno de 40% do custo do filtro, restando 30% para os reatores e 30% para o restante dos componentes.

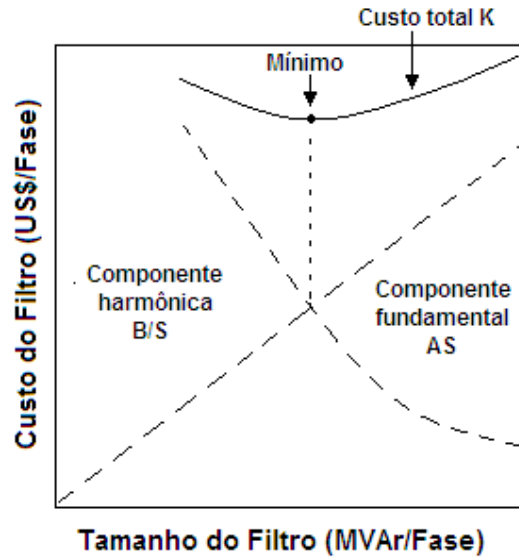


Figura 3.11 – Custo de um filtro Sintonizado.

3.8 Conclusões Gerais

Este capítulo apresentou métodos de mitigação de harmônicos baseado em filtros passivos. Caso o sinal a ser medido esteja fora do recomendado pela norma deve-se empregar alguns dos métodos apresentados para reduzir as distorções e atender as exigências estipuladas pela legislação. Além de critérios práticos de projeto são identificados também algumas propriedades dos componentes dos filtros. No anexo é descrito passo a passo o projeto de filtros utilizando os métodos de sintonia apresentados.

Ao longo de vários anos, devido a fatores científicos, tecnológicos e econômicos, esta tem se firmado como a solução mais tradicional para a redução de harmônicos

4 ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE UM CONSUMIDOR INDUSTRIAL

A planta industrial em análise, está localizada no Estado da Bahia. É uma instalação do tipo eletrointensiva. Em particular, é uma empresa siderúrgica com produção de 500.000 toneladas de aço por ano. A energia elétrica, em sua maioria, é utilizada nos fornos a arco elétrico para a fusão da matéria-prima (sucata/ferro esponja) e posterior refino.

Inicialmente são realizadas as medições de grandezas elétricas do sistema elétrico desta planta industrial e então será feito o diagnóstico sobre a situação deste consumidor, com relação as distorções harmônicas de corrente e de tensão, comparativamente aos critérios recomendados pela legislação [13]. Os resultados aqui descritos sintetizam os estudos e as monitorações realizadas nos períodos compreendidos entre os dias 20 e 23 de maio e 04 de julho de 2008. Importante ressaltar que esta amostragem representa a operação normal do sistema, considerando sua dinâmica de operação e suprimento de energia.

As grandezas contempladas nos estudos a serem descritos são:

- Tensões e correntes eficazes;
- Distorções harmônicas totais das tensões e correntes;
- Amplitudes individuais das harmônicas mais significativas das tensões e correntes;

Para cada perfil apresentado ao longo do tempo, são extraídos os valores máximos, mínimos, médios e P95%. Estes são:

- *Valor máximo*: associado ao maior registro encontrado durante o período de monitoração;
- *Valor mínimo*: associado ao menor registro encontrado durante o período de monitoração;
- *Valor médio*: associado ao valor médio encontrado durante o período de monitoração;
- *P95%*: expressa que, em 95% do tempo monitorado, as grandezas monitoradas apresentam níveis iguais ou abaixo dos valores preenchidos na coluna P₉₅%.

A avaliação apresentada busca oferecer dados reais das condições de operação da planta. Este trabalho foi realizado com o interesse de ampliar de forma segura o sistema

elétrico e, se for o caso, adotar procedimentos para atender os limites estipulados pela legislação brasileira. As medições foram realizadas no secundário dos principais transformadores da indústria. Será realizada uma avaliação de cada ponto e uma avaliação geral da operação da planta. As medições apresentadas consideram os filtros já instalados na planta. Estes filtros compreendem um filtro de 3º harmônico do forno EBT e os filtros para 5º, 7º, 11º harmônicos na Laminação. Todos estes filtros foram instalados no secundário dos respectivos transformadores.

4.1 Sistema Elétrico

A Figura 4.1 apresenta o diagrama unifilar geral simplificado do sistema elétrico do consumidor, mostrando as cargas de interesse para a análise harmônica com os pontos de medição e as principais características do complexo elétrico analisado.

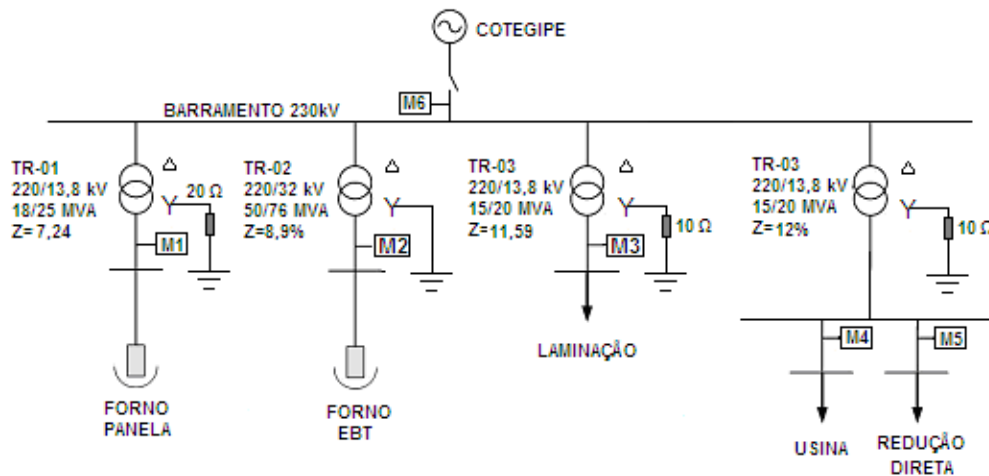


Figura 4.1 – Diagrama unifilar geral simplificado

A alimentação é feita por uma linha de transmissão em 230 kV. O fornecimento da energia elétrica é de responsabilidade da CHESF, subestação de Cotegipe, como indicado no diagrama unifilar apresentado na Figura 4.1.

Os locais selecionados para as medições foram os pontos M1, M2, M3, M4, M5 e M6. Tais pontos de monitoramento retratam as grandezas observadas no secundário dos principais transformadores do complexo industrial, cujas características são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados dos transformadores relacionados no diagrama unifilar

Equipamentos	Dados										
Transformador 1 que alimenta o forno Panela (TR 01)	<table border="1"> <tr> <td>Potência</td> <td>18/25MVA</td> </tr> <tr> <td>Tensão</td> <td>230/13,8KV</td> </tr> <tr> <td>Impedância</td> <td>7,24 %</td> </tr> <tr> <td>Ligação</td> <td>Delta – estrela aterrado</td> </tr> <tr> <td>Relação do TC</td> <td>800 x 5</td> </tr> </table>	Potência	18/25MVA	Tensão	230/13,8KV	Impedância	7,24 %	Ligação	Delta – estrela aterrado	Relação do TC	800 x 5
Potência	18/25MVA										
Tensão	230/13,8KV										
Impedância	7,24 %										
Ligação	Delta – estrela aterrado										
Relação do TC	800 x 5										
Transformador 2 que alimenta o forno EBT (TR 02)	<table border="1"> <tr> <td>Potência</td> <td>50/76MVA</td> </tr> <tr> <td>Tensão</td> <td>220/32KW</td> </tr> <tr> <td>Impedância</td> <td>8,9%</td> </tr> <tr> <td>Ligação</td> <td>Delta – estrela aterrado</td> </tr> <tr> <td>Relação do TC</td> <td>1500 x 5</td> </tr> </table>	Potência	50/76MVA	Tensão	220/32KW	Impedância	8,9%	Ligação	Delta – estrela aterrado	Relação do TC	1500 x 5
Potência	50/76MVA										
Tensão	220/32KW										
Impedância	8,9%										
Ligação	Delta – estrela aterrado										
Relação do TC	1500 x 5										
Transformador 3 que alimenta a Laminação (TR 03)	<table border="1"> <tr> <td>Potência</td> <td>15/20MVA</td> </tr> <tr> <td>Tensão</td> <td>220/13,8KV</td> </tr> <tr> <td>Impedância</td> <td>11,3 %</td> </tr> <tr> <td>Ligação</td> <td>Delta – estrela aterrado</td> </tr> <tr> <td>Relação do TC</td> <td>1000 x 5</td> </tr> </table>	Potência	15/20MVA	Tensão	220/13,8KV	Impedância	11,3 %	Ligação	Delta – estrela aterrado	Relação do TC	1000 x 5
Potência	15/20MVA										
Tensão	220/13,8KV										
Impedância	11,3 %										
Ligação	Delta – estrela aterrado										
Relação do TC	1000 x 5										
Transformador 4 que alimenta a Redução Direta e geral da empresa (TR 04)	<table border="1"> <tr> <td>Potência</td> <td>15/20MVA</td> </tr> <tr> <td>Tensão</td> <td>220/13,8KV</td> </tr> <tr> <td>Impedância</td> <td>11,3 %</td> </tr> <tr> <td>Ligação</td> <td>Delta – estrela aterrado</td> </tr> <tr> <td>Relação do TC</td> <td>1000 x 5</td> </tr> </table>	Potência	15/20MVA	Tensão	220/13,8KV	Impedância	11,3 %	Ligação	Delta – estrela aterrado	Relação do TC	1000 x 5
Potência	15/20MVA										
Tensão	220/13,8KV										
Impedância	11,3 %										
Ligação	Delta – estrela aterrado										
Relação do TC	1000 x 5										

4.2 Equipamento Utilizado na Medição

As medições conduzidas no sistema elétrico em análise compreenderam registros de tensão e corrente em regime permanente e perfis do comportamento das distorções harmônicas de tensão e de corrente ao longo do tempo. Para viabilizar tais amostragens foi utilizado o *registrador Marh 21*: fabricante: RMS Sistemas Eletrônicos – Brasil; tensão de alimentação: c.a. 70 a 600V, frequência: 50Hz ou 60Hz e c.c. 11 a 600V; exatidão: classe 0,5 para tensões e correntes e classe 1 para potências; tem a capacidade de avaliar as perturbações na rede elétrica (conteúdo harmônico de tensão e corrente até 61°, variações momentâneas de tensão, “sag”, “swell”, etc); e disponibiliza gráficos com as variações das grandezas medidas ao longo do tempo.

O tratamento das grandezas amostradas foi realizado com base nos seguintes procedimentos:

- Para a apresentação dos resultados das distorções percentuais de tensão (indicadas por $DHT_V\%$), empregou-se como tensão base a própria tensão fundamental determinada a cada instante;
- Para o caso das distorções harmônicas de corrente (indicadas por $DHT_I\%$), estas foram determinadas em termos percentuais utilizando-se sempre a corrente fundamental no instante da medição do correspondente ponto do circuito que foi analisado;
- Os resultados expressam as distorções totais e as individuais mais significativas;

4.3 Ponto de Medição M1 – Transformador TR-01

As medições realizadas neste ponto ocorreram entre as 12h08min e 14h40min do dia 20/05/2008. Conforme mencionado, o presente conjunto de resultados retrata o comportamento dos valores eficazes das tensões e correntes, bem como das respectivas distorções harmônicas durante o período de monitoração. Assim sendo, os tópicos listados na seqüência sintetizam os registros em gráficos e tabelas, permitindo, assim, uma análise global do ocorrido para estes parâmetros elétricos.

O ponto M1 corresponde ao comportamento da tensão de alimentação do forno panela (refino) medido no secundário do transformador 1.

4.3.1 Análise das Tensões

A Figura 4.2 mostra o perfil das tensões eficazes no ponto M1 enquanto que a Figura 4.3 mostra o comportamento da taxa de distorção harmônica destas mesmas tensões. As tabelas 4.2 e 4.3 mostram as variações das tensões eficazes e as taxas de distorções harmônicas destas tensões. A tabela 4.4 mostra a contribuição individual máxima, mínima, média e P95% das tensões de fase de entrada.

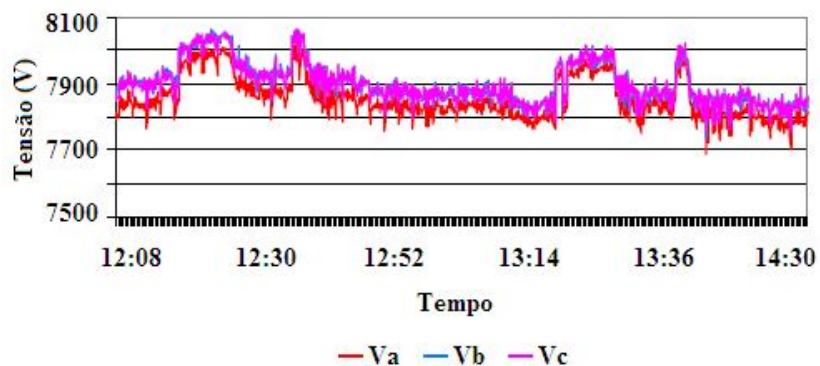


Figura 4.2 – Perfil das tensões eficazes fase-neutro ponto M1.

Tabela 4.2 - Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M1

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO			
Tensão	Van [V]	Vbn [V]	Vcn [V]
Máximo	8020,51	8064,14	8065,82
Mínimo	7856,48	7901,73	7902,78
Médio	7688,90	7757,63	7734,34
P95%	7981,75	8030,03	8031,38

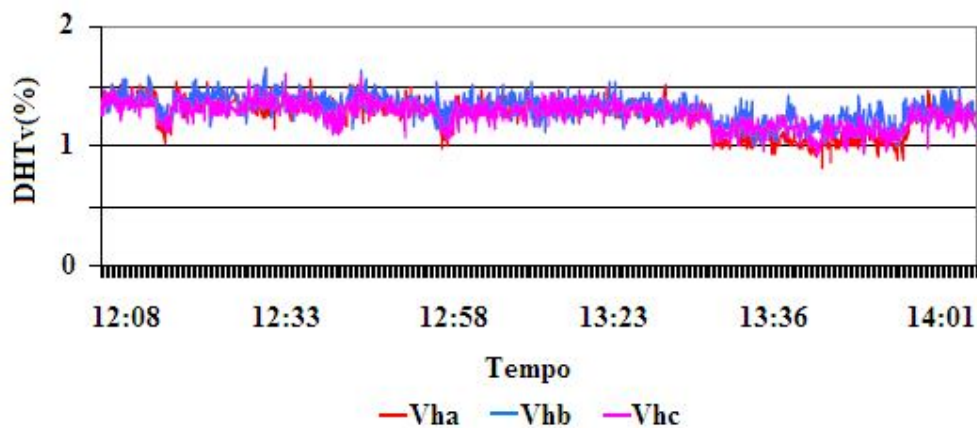


Figura 4.3 – Perfil das distorções harmônica totais das tensões fase-neutro ponto M1

Tabela 4.3 - Valores estatísticos das distorções totais de tensão ponto M1.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO			
Tensão	V _{an} [%]	V _{bn} [%]	V _{cn} [%]
Máximo	1,56	1,61	1,65
Mínimo	1,26	1,26	1,31
Médio	0,81	0,94	1,00
P95%	1,44	1,41	1,48

Tabela 4.4 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M1.

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	0,45	0,01	0,16	0,28
5	1,35	0,53	0,97	1,13
7	0,44	0,03	0,21	0,31
11	0,90	0,02	0,49	0,73
13	0,40	0,01	0,20	0,30
17	0,23	0,00	0,08	0,14
19	0,24	0,00	0,09	0,17
23	0,32	0,00	0,13	0,23
25	0,20	0,00	0,08	0,15

De posse dos resultados, a Figura 4.4 apresenta uma síntese dos valores P95% das amplitudes das distorções individuais de tensão obtidas ao longo do tempo de monitoração. Foram considerados os harmônicos mais significativos para serem apresentados.

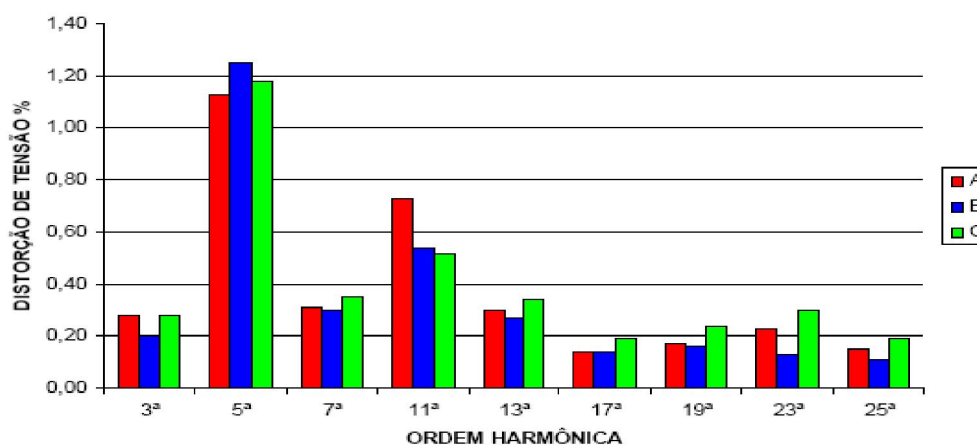


Figura 4.4 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M1.

Para a análise das distorções de tensão no ponto de medição M1, a resolução da ANEEL nº 505/2001 estabelece que os valores eficazes de tensão podem variar entre 0,93 pu (7409 V) e 1,05 pu (8365 V) e no ponto de medição em análise os valores de tensão variam entre 7856 V (fase A) e 8065 V (fase C).

Com relação aos harmônicos da tensão, considerando os valores P95%, a distorção ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma. A distorção harmônica total foi de 1,48% sendo que o limite estipulado pela legislação é de 6%. O harmônico de maior amplitude é o 5º alcançando o valor de 1,13% sendo que o máximo valor permitido é de 5%.

Com base na avaliação realizada, o ponto de medição M1 está de acordo com o estabelecido nas normas e resoluções tanto em relação aos harmônicos quanto em relação aos limites de tensão.

4.3.2 Análise das Correntes

Os resultados das medições de corrente realizadas no transformador que alimenta o forno panela são apresentadas na Figura 4.5. Apesar de não existir uma norma nacional que oriente sobre os limites da amplitude de harmônicos de corrente será utilizada a norma IEEE 519-1992 para a avaliação das distorções.

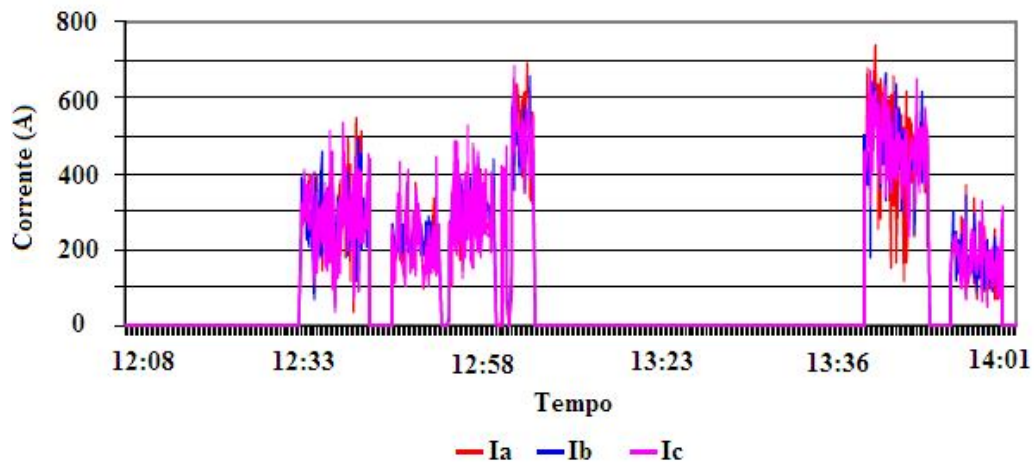


Figura 4.5 – Perfil das correntes de linha eficaz do ponto de medição M1.

Tabela 4.5 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficaz ponto M1.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [A]
Máximo	739,42
Mínimo	0,00
Médio	106,35
P95%	504,21

A Figura 4.6 apresenta o comportamento da distorção harmônica de corrente durante o período de funcionamento do forno panela, foi extraído do período de monitoração o intervalo que a distorção harmônica se mostrou mais elevada, ou seja, entre as 13h14min e 13h18min do dia 20/05/2008.

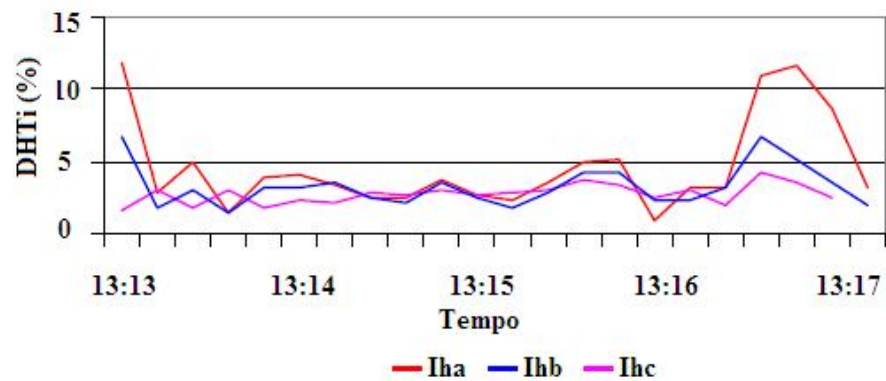


Figura 4.6 – Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M1.

Tabela 4.6 – Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M1.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [%]
Máximo	11,88
Mínimo	0,85
Médio	4,59
P95%	11,61

Tabela 4.7 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente no ponto M1.

Distorção Harmônica Individual de Corrente - Fase A				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	10,62	0,18	0,61	9,72
4	1,41	0,00	0,63	1,29
5	2,98	0,14	1,17	2,75
6	1,46	0,07	0,39	2,57
7	1,74	0,09	0,63	1,52
8	0,95	0,03	0,18	0,45
9	0,56	0,04	0,24	0,51
11	0,70	0,02	0,20	0,42
12	0,55	0,02	0,42	0,55
13	0,38	0,00	0,13	0,28
19	0,22	0,02	0,08	0,21

A Figura 4.7 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de corrente obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências para o transformador que alimenta o forno panela.

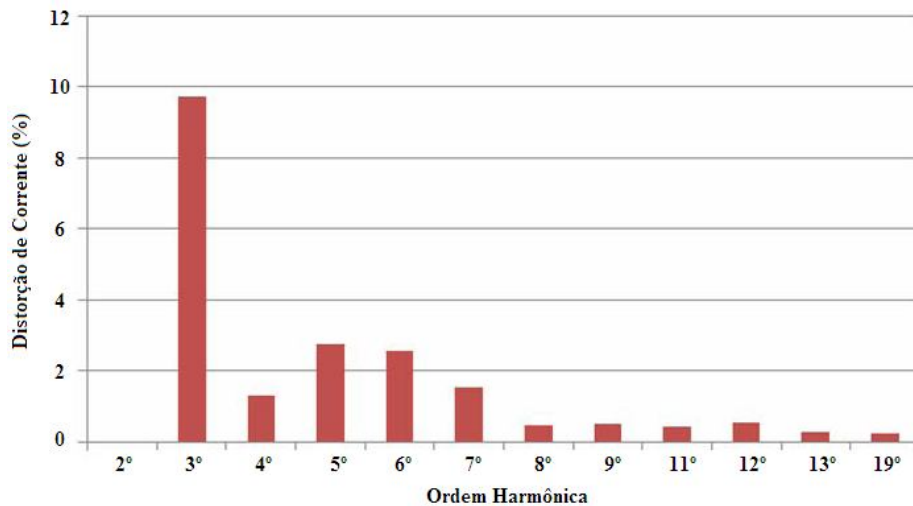


Figura 4.7 – Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M1.

Para a análise das distorções de corrente no ponto de medição M1, considera-se que a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental do sinal medido é de $196,9 I_{cc}/I_{carga}$ entre 100 e 1000, a partir da Tabela 2.8 os harmônicos individuais de corrente estão de acordo com o estabelecido na norma IEEE 519-1992 para harmônicos de ordem inferior a 11 é 12%. A ordem harmônica que mais se aproxima deste valor é a 3ª

com 9,72%. A DTD é de 10,6% e o limite é 15%. Dessa forma este ponto atende aos limites estabelecidos pela norma.

4.4 Ponto de Medição M2 – Transformador Tr2

As medições realizadas neste ponto ocorreram entre às 15h08min do dia 20/05/2008 até às 10h16min do dia 21/05/2008. O forno EBT (fusão) é alimentado por este transformador. Em função do seu comportamento não linear é o ponto mais crítico da operação da planta.

4.4.1 Análise das Tensões

Devido ao fato de haver somente dois TP's para a aquisição dos sinais neste ponto de medição, o monitoramento realizado no secundário do transformador TR-2 contempla os valores obtidos para as fases A e C. No ponto de medição M2 foram medidas as tensões fase-fase.

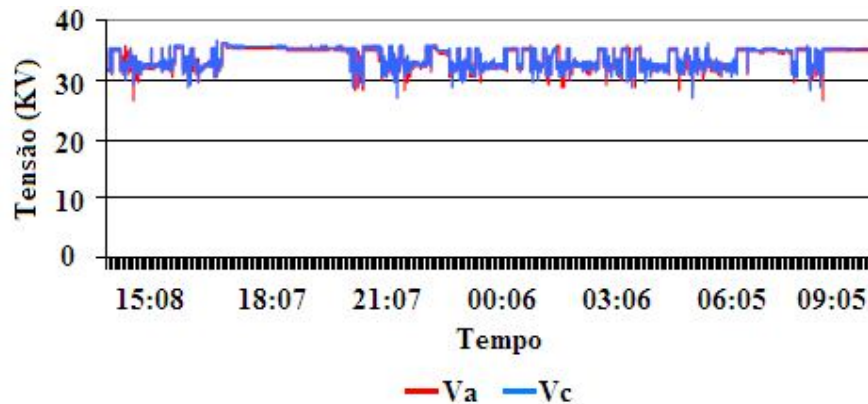


Figura 4.8 – Perfil das tensões eficazes do ponto M2

Tabela 4.8 – Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M2

Tensão	Va [V]	Vc [V]
Máximo	35694,55	36268,49
Mínimo	26359,92	26689,23
Médio	33491,57	33690,40
P95%	35233,31	35502,13

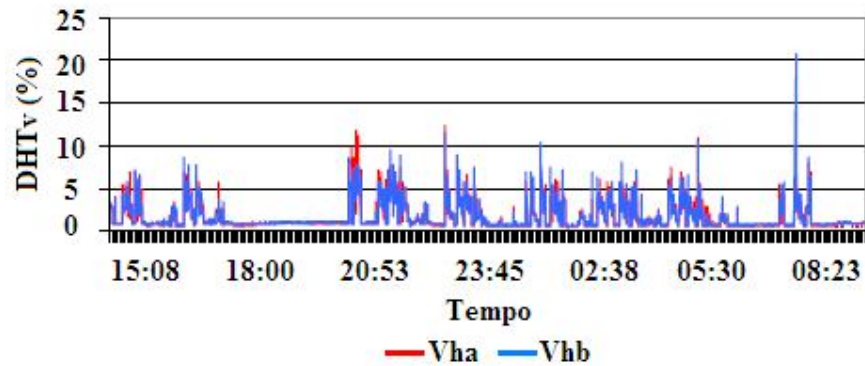


Figura 4.9 – Perfil das distorções harmônicas totais das tensões do ponto M2

Tabela 4.9 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M2.

Tensão	Va [%]	Vc [%]
Máximo	12,32	20,64
Mínimo	0,39	0,45
Médio	1,56	1,61
P95%	4,68	4,64

Tabela 4.10 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M2.

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
2	10,34	0,00	0,39	1,89
3	6,33	0,00	0,35	1,53
4	4,09	0,00	0,19	0,87
5	4,52	0,00	0,95	2,43
6	4,16	0,00	0,17	0,79
7	3,31	0,00	0,36	1,33
8	2,28	0,00	0,13	0,59
9	3,34	0,00	0,18	0,74
10	2,88	0,00	0,13	0,57
11	3,20	0,00	0,24	0,80
12	4,25	0,00	0,15	0,78
13	3,92	0,00	0,23	0,88

A Figura 4.10 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de tensão obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências considerando as fases A e C.

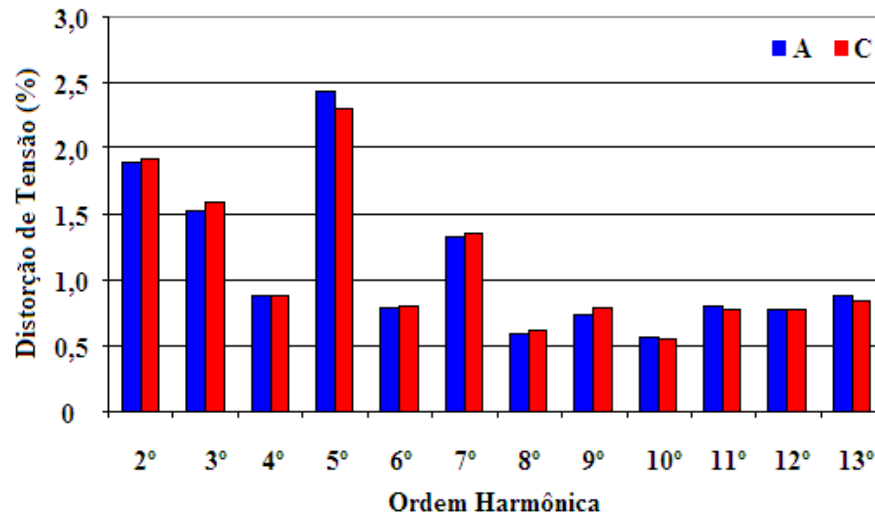


Figura 4.10 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M2.

Analisando as distorções de tensão no ponto de medição M2, com relação aos valores eficazes de tensão, a barra está em desacordo com o estabelecido na resolução da ANEEL no 505/2001 que é de 0,93 a 1,05 pu, que no caso em questão seria a variação entre 29,76 kV a 33,6 kV. No entanto as medições revelaram que a tensão está na faixa de 26,4kV (fase A) a 36,3kV (fase C) que é uma tensão crítica.

Com relação aos harmônicos da tensão, considerando os valores P95%, a distorção ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma. A distorção harmônica total foi de 4,68% sendo que o limite estabelecido pelo ONS é de até 6%. O harmônico de maior amplitude é o 5º alcançando o valor de 2,43% sendo que o máximo valor permitido é de 5%. O ponto M2 está de acordo com o estabelecido na norma referente as distorções harmônicas, mas não atende no quesito limites de tensão. Diante deste quadro, deve-se atentar para os níveis de susceptibilidade às sobretensões das cargas conectadas a este barramento, ou seja, sobretensões deste nível reduzem a vida útil dos equipamentos elétricos em geral e podem provocar queima de equipamentos e conseqüentemente desligamentos não programados.

Este fato ocorre devido a não haver chaveamento do banco de capacitores durante o período que o forno aguarda o aumento da carga fria (sucata) ou quando ocorre desligamentos do forno.

4.4.2 Análise das Correntes

A Figura 4.11 mostra os perfis das correntes trifásicas de linha no ponto sob análise. O eixo vertical é auto-explicativo, enquanto que o horizontal corresponde ao tempo de monitoração.

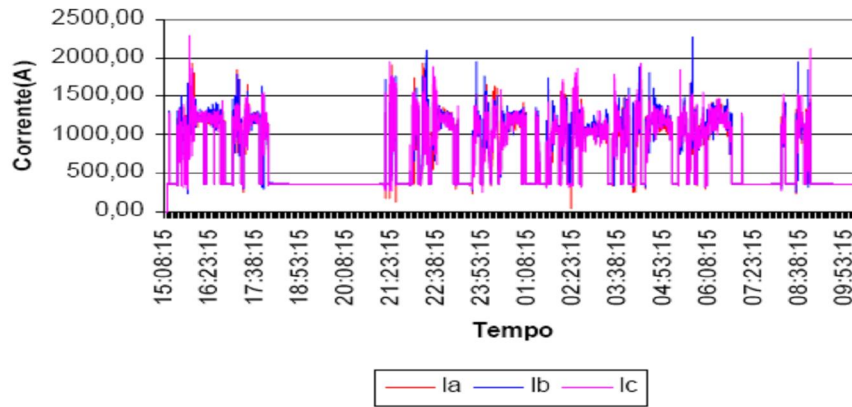


Figura 4.11 – Perfil das correntes eficazes do ponto M2.

Tabela 4.11 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficaz do ponto M2.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [A]
Máximo	1937,93
Mínimo	0,00
Médio	730,11
P95%	1296,13

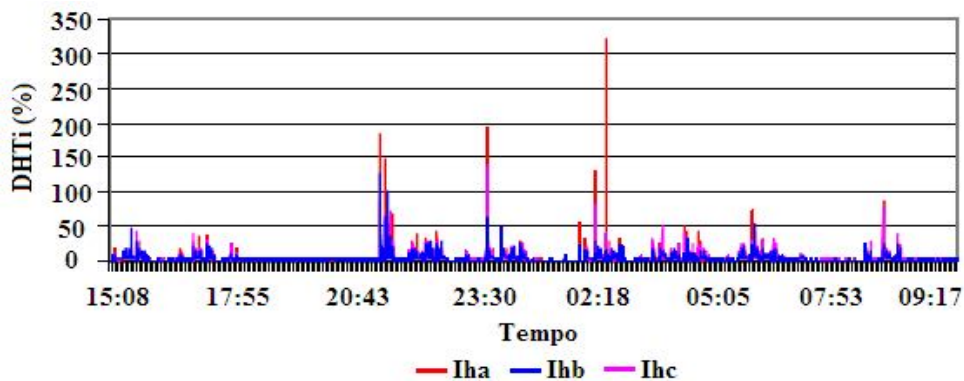


Figura 4.12 – Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M2.

Tabela 4.12 – Valores estatísticos da distorção total da corrente do ponto M2.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [%]
Máximo	319,48
Mínimo	0,00
Médio	3,71
P95%	12,33

Tabela 4.13 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M2.

Distorção Harmônica Individual de Corrente - Fase A				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
2	0,00	1,93	194,65	8,42
3	0,00	1,62	227,49	5,55
4	0,00	0,62	69,29	2,70
5	0,00	1,66	58,21	3,91
6	0,00	0,37	50,80	1,57
7	0,00	0,49	30,57	1,87
8	0,00	0,26	42,64	1,04
9	0,00	0,26	12,88	1,07
10	0,00	0,20	14,45	0,82
11	0,00	0,21	13,08	0,80
12	0,00	0,17	17,32	0,65
13	0,00	0,17	15,41	0,62

De posse dos resultados, a Figura 4.13 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de corrente obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

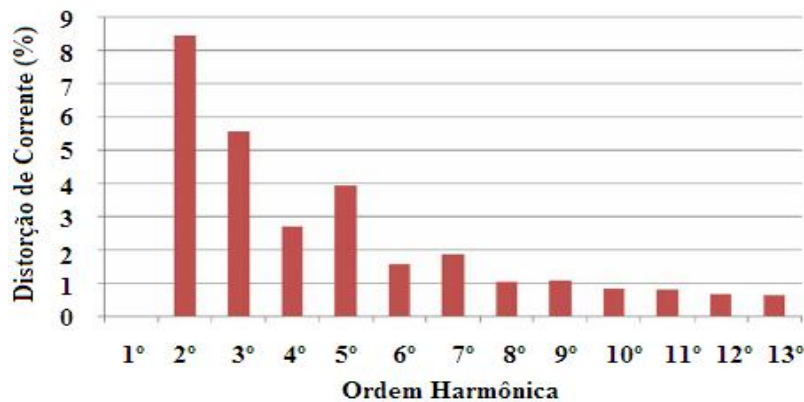


Figura 4.13 – Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M2.

Pela análise das distorções de corrente no ponto de medição M2, considerando que a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental do sinal medido é de 41,7 permite que harmônicos individuais de correntes alcancem no máximo 7% para os harmônicos ímpares e 1,75% para os harmônicos pares, observa-se que o 2º e o 4º harmônicos ultrapassaram este limite, 8,52% e 2,7% respectivamente. As outras componentes harmônicas estão dentro do recomendado. A DTD deste ponto de medição é de 10,83% enquanto que o limite aconselhável é de 8%. Sendo assim, deve-se acompanhar a operação do forno de forma a evitar que estes harmônicos de 2º e 4º ordem possam trazer algum problema para o sistema. O forno EBT (fusão) possui uma não linearidade muito grande em sua operação. Devido ao posicionamento da sucata, principalmente no início do processo de fusão, existe um desequilíbrio grande na tensão. Como pode-se perceber pelo elevado valor da componente de 2ª ordem.

4.5 Ponto de Medição M3 – Transformador TR3

As medições realizadas neste ponto ocorreram entre as 12h12min até às 15h14min do dia 21/05/2008. Os tópicos listados na seqüência sintetizam os registros em gráficos e tabelas, permitindo, assim, uma análise global do ocorrido para estes parâmetros elétricos.

Este ponto M3 corresponde ao secundário do transformador responsável pela alimentação da laminação.

4.5.1 Análise das Tensões

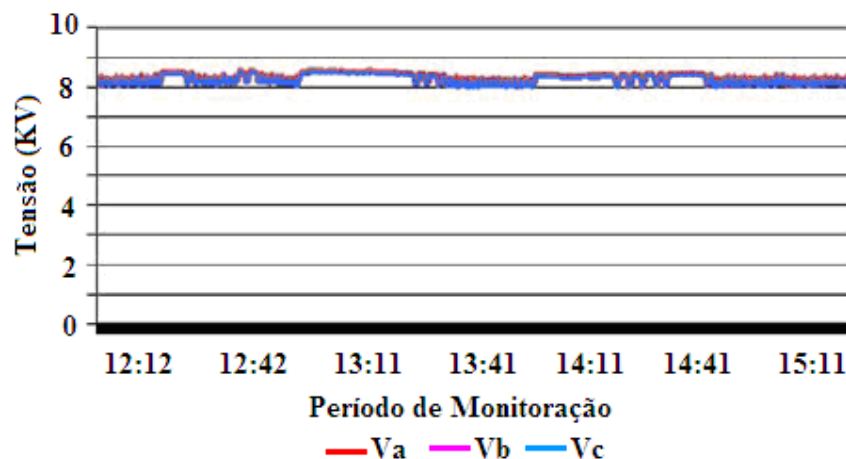


Figura 4.14 – Perfil das tensões fase-neutro valores eficazes do ponto M3.

Tabela 4.14 – Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M3.

Tensão	V _{an} [V]	V _{bn} [V]	V _{cn} [V]
Máximo	8573,81	8587,21	8523,05
Mínimo	8043,62	8048,79	7982,75
Médio	8299,20	8311,73	8245,79
P95%	8537,58	8547,88	8481,54

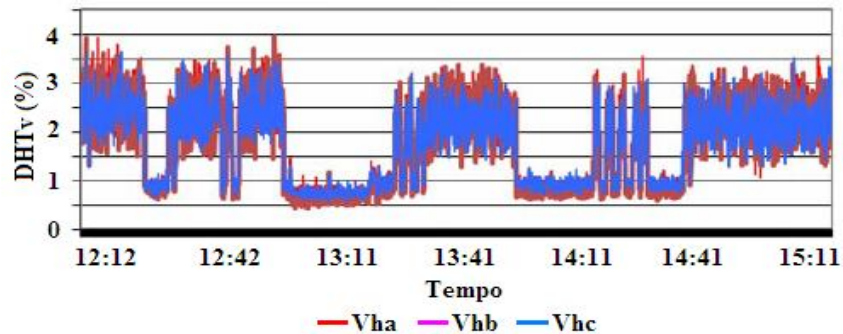


Figura 4.15 – Perfil das distorções harmônicas totais das tensões do ponto M3.

Tabela 4.15 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M3

Tensão	V _{an} [%]	V _{bn} [%]	V _{cn} [%]
Máximo	3,93	3,95	3,64
Mínimo	0,55	0,44	0,56
Médio	1,84	1,73	1,72
P95%	3,07	3,04	2,86

Tabela 4.16 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M3

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Médio (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	P95 (%)
3	0,05	0,48	1,15	0,74
5	0,01	0,32	1,10	0,74
7	0,00	0,44	1,36	0,96
9	0,00	0,31	1,13	0,74
11	0,00	0,20	0,69	0,50
13	0,00	0,35	1,10	0,75
15	0,00	0,36	1,19	0,80
17	0,00	0,38	1,05	0,77
19	0,00	0,69	2,15	1,56
21	0,01	0,59	1,93	1,32
23	0,00	0,42	1,40	0,93
25	0,00	0,35	1,23	0,84

A Figura 4.16 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de tensão obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

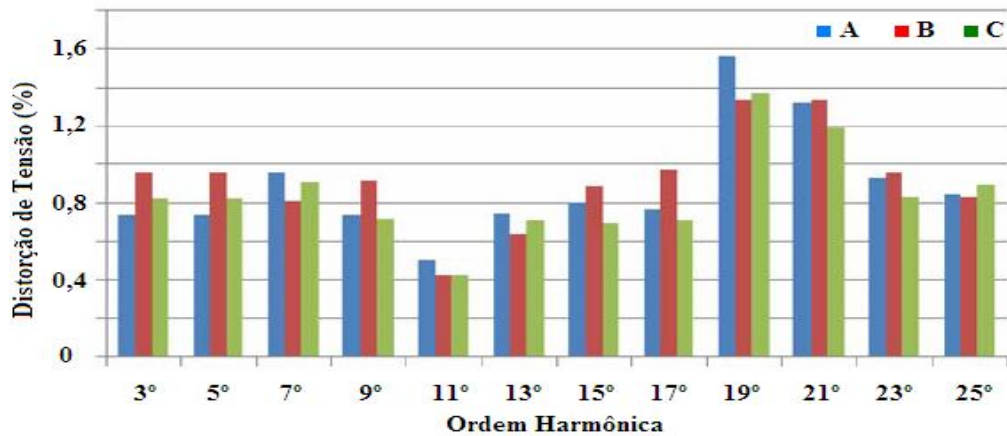


Figura 4.16 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M3.

Pela análise das distorções de tensão no ponto de medição M3, com relação aos valores eficazes de tensão, a barra está com valor superior ao estabelecido na resolução da ANEEL no 505/2001 que é de 0,93 (7,41 kV) a 1,05 pu (8,36 kV). As medições mostram que a tensão está na faixa de 7,98 kV (fase C) e 8,59 kV (fase B), tendo esta última ultrapassado o limite da resolução da ANEEL.

Em relação aos harmônicos da tensão, a distorção ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma. A DHT_v no ponto de medição foi de 3,07% e o máximo estabelecido pela legislação é de 6%. O harmônico de maior amplitude é o 19°. Com um valor de 1,56% , bem abaixo dos 3% permitidos pela norma..

Com base na avaliação realizada, no ponto de medição M3 é necessário um ajuste de TAP do transformador que alimenta a Laminação afim de corrigir a amplitude da tensão da operação da planta. Em relação às distorções harmônicas, seus valores estão de acordo com o estabelecido em IEEE 519-1992 referentes as distorções harmônicas. A Laminação também possui um conjunto de filtros e durante o período de desligamento de suas instalações causa está sobretensão na rede, pois os filtros não possuem nenhum tipo de chaveamento para controlar a potência reativa inserida no sistema.

4.5.2 Análise das Correntes

A Figura 4.17 mostra os perfis trifásicos das correntes de linha no ponto sob análise. O eixo vertical é auto-explicativo, enquanto que o horizontal corresponde ao tempo de monitoração.

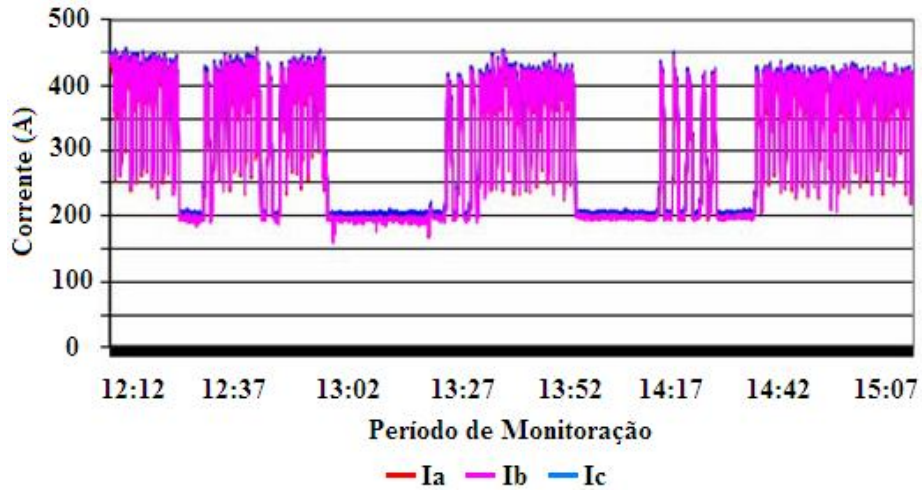


Figura 4.17 – Perfil da corrente nas fases – Valores eficazes do ponto M3.

Tabela 4.17– Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficazes

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [A]
Máximo	444,50
Mínimo	161,64
Médio	299,33
P95%	422,16

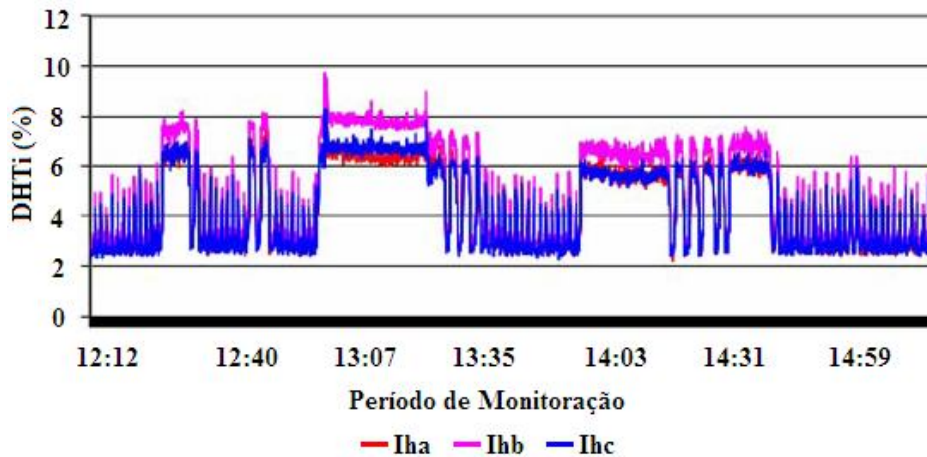


Figura 4.18 – Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M3

Tabela 4.18 – Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M3

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [%]
Máximo	8,14
Mínimo	2,26
Médio	4,41
P95%	6,59

Tabela 4.19 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M3

Distorção Harmônica Individual de Corrente - Fase A				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
3	0,76	2,13	4,21	3,36
5	1,75	3,69	7,26	5,69
7	0,02	0,38	1	0,67
9	0	0,14	0,54	0,29
11	0,01	0,18	0,52	0,36
13	0	0,21	0,92	0,46
15	0	0,1	0,38	0,21
17	0,01	0,29	0,75	0,51
19	0	0,29	0,75	0,53
21	0,01	0,13	0,49	0,28
23	0,01	0,26	0,64	0,44
25	0	0,17	0,6	0,31

A Figura 4.19 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de corrente obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

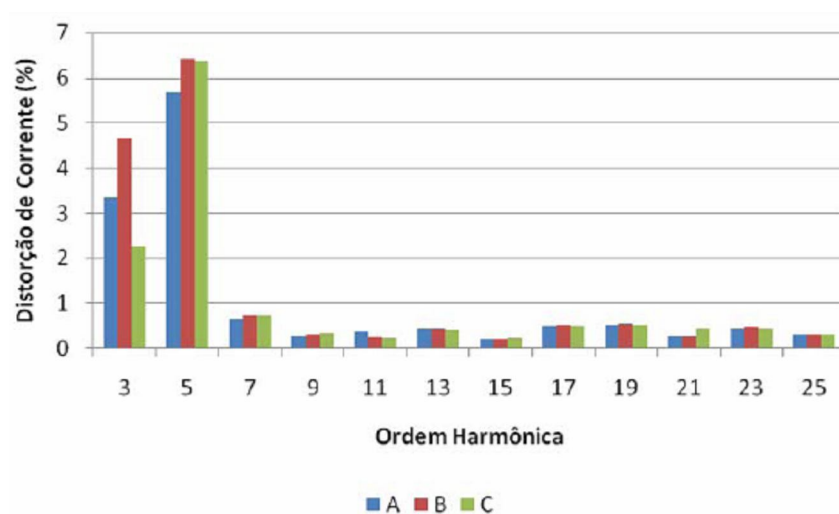


Figura 4.19 – Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M3

Pela análise das distorções de corrente no ponto de medição M3, considerando que a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental do sinal medido é de 210,85, observa-se que todas as distorções estão abaixo dos limites estipulados pela norma. A DTD deste ponto de medição é de 5,96% enquanto que o limite aceitável é de 15%.

4.6 Ponto de Medição M4 – Transformador TR4

As medições realizadas neste ponto ocorreram entre as 16h08min do dia 21/05/2008 até às 09h35min do dia 22/05/2008. O presente conjunto de resultados retrata o comportamento das tensões e correntes durante o período de monitoração.

Este ponto M4 corresponde carga referente as instalações gerais da usina (lingotamento, prensa, iluminação, administração, auxiliares da Aciaria).

4.6.1 Análise das Tensões

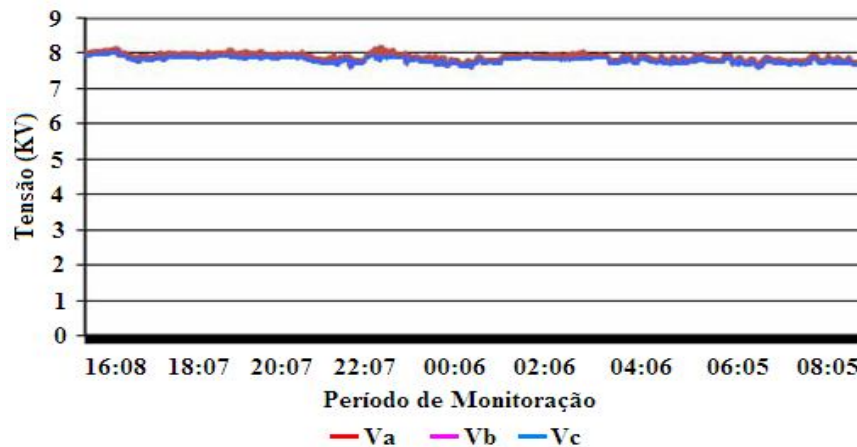


Figura 4.20 – Perfil das tensões fase-neutro valores eficazes do ponto M4.

Tabela 4.20 – Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M4.

Tensão	Van [V]	Vbn [V]	Vcn [V]
Máximo	8085,56	8154,18	8049,68
Médio	7858,50	7883,76	7829,84
Mínimo	7636,61	7647,37	7607,01
P95%	7971,64	8017,39	7940,69

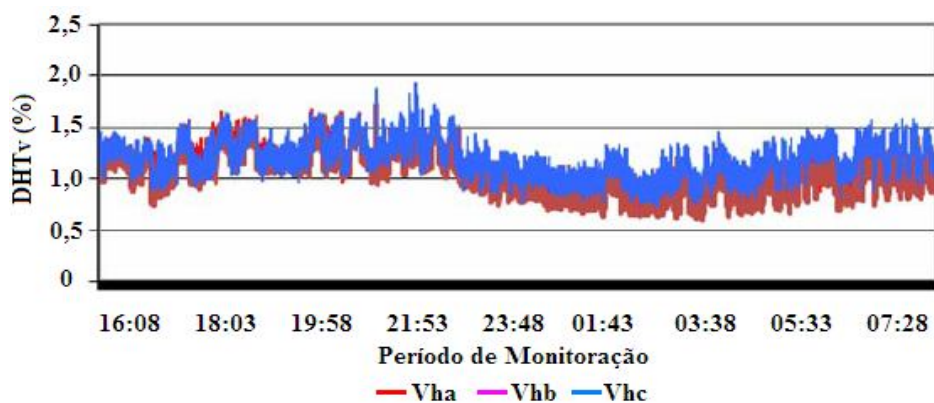


Figura 4.21 – Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro

Tabela 4.21 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M4.

Tensão	Van [%]	Vbn [%]	Vcn [%]
Máximo	1,88	1,71	1,93
Médio	1,12	1,02	1,18
Mínimo	0,64	0,59	0,72
P95%	1,48	1,39	1,49

Tabela 4.22 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M4.

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
3	0,00	0,12	0,73	0,24
5	0,34	0,89	1,68	1,30
7	0,01	0,21	0,58	0,40
9	0,00	0,07	0,38	0,15
11	0,02	0,28	0,84	0,55
13	0,00	0,18	0,42	0,31
15	0,00	0,06	0,21	0,11
17	0,00	0,07	0,22	0,13
19	0,00	0,08	0,25	0,16
21	0,00	0,17	0,49	0,32
23	0,00	0,12	0,31	0,22
25	0,00	0,07	0,23	0,14

De posse dos resultados, a Figura 4.22 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de tensão obtidas ao longo do tempo de monitoração.

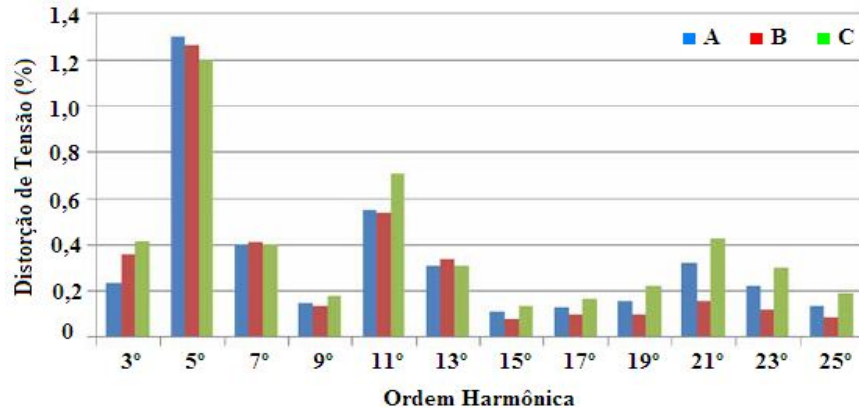


Figura 4.22 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M4.

Pela análise das distorções de tensão no ponto de medição M4, a tensão na barra varia de 7,940 kV a 8,02 kV e atende ao estabelecido na resolução da ANEEL no 505/2001 que é de 0,93 (7,41 kV) a 1,05 (8,36 kV) pu.

Em relação aos harmônicos de tensão, considerando os valores P95%, a distorção ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma. A DHT da tensão foi de 1,49%, abaixo do estabelecido pela norma que é de 6%. O mesmo ocorrendo para as distorções individuais com seu maior valor em 1,3% (5° harmônico) e até 5% é permitido.

Com base na avaliação realizada o ponto de medição M4 está de acordo com o estabelecido nas normas referentes as distorções harmônicas e os limites de tensão.

4.6.2 Análise das Correntes

A Figura 4.26 mostra os perfis trifásicos das correntes de linha no ponto sob análise. O eixo vertical é auto-explicativo, enquanto que o horizontal corresponde ao tempo de monitoração.

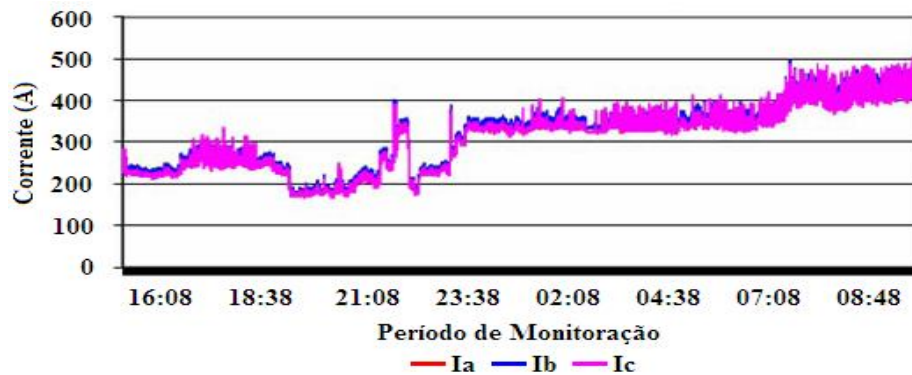


Figura 4.23 – Perfil da corrente nas fases valores eficazes do ponto M4.

Tabela 4.23 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das correntes eficazes.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [A]
Máximo	491,16
Médio	307,03
Mínimo	166,03
P95%	429,84

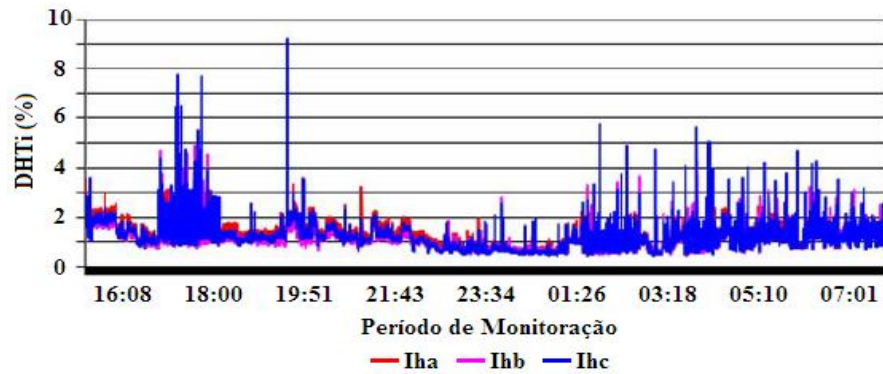


Figura 4.24 – Perfil da distorção harmônica total da correntes de linha do ponto M4.

Tabela 4.24 – Valores estatísticos da distorção total de corrente

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ic [%]
Máximo	9,27
Médio	1,18
Mínimo	0,49
P95%	2,01

Tabela 4.25 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M4.

Distorção Harmônica Individual de Corrente - Fase C				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
3	0,01	0,38	3,41	0,86
5	0	0,82	3,58	1,48
7	0	0,3	1,02	0,67
9	0	0,06	0,67	0,14
11	0	0,28	1,04	0,43
13	0	0,22	0,86	0,36
15	0	0,06	0,54	0,13
17	0	0,09	0,53	0,18
19	0	0,07	0,52	0,16
21	0	0,12	0,48	0,25
23	0	0,09	0,52	0,19
25	0	0,06	0,44	0,14

A Figura 4.25 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de corrente obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

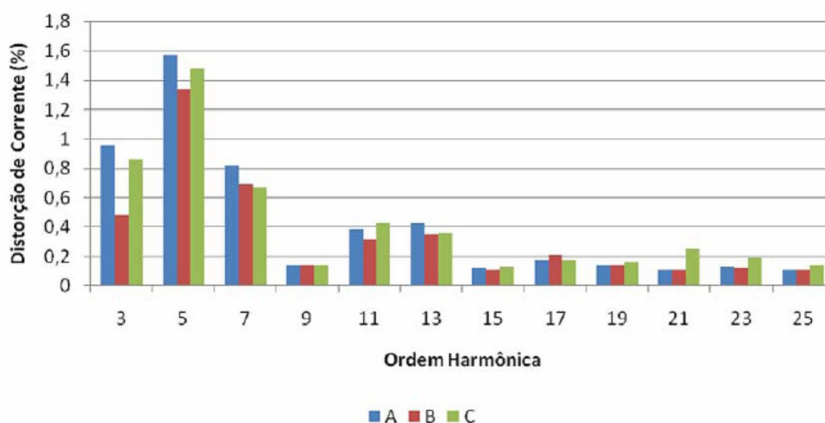


Figura 4.25 – Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M4.

Analisando das distorções de corrente no ponto de medição M4 e considerando que a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental do sinal medido é de 137,18, os valores das distorções harmônicas de corrente apresentados estão de acordo com os limites permitidos. Observa-se que o valor da componente de 5º. harmônico foi o mais elevado, mas mesmo assim abaixo do permitido pela IEEE 519. As outras componentes harmônicas estão dentro do recomendado. A DTD deste ponto de medição é de 1,54% enquanto que o limite aconselhável é de 15%. Sendo assim, este ponto de medição esta de acordo com a norma.

4.7 Ponto de Medição M5 – Transformador TR5

As medições realizadas neste ponto ocorreram entre as 11h09min e 13h29min do dia 22/05/2008. O conjunto de resultados apresentados neste nesta seção retrata o comportamento dos valores eficazes das tensões e correntes, bem como das suas respectivas distorções harmônicas durante o período de monitoração. Assim sendo, os tópicos listados na seqüência sintetizam os registros em gráficos e tabelas, permitindo, assim, uma análise global do sistema no ponto M5.

4.7.1 Medições de Tensão

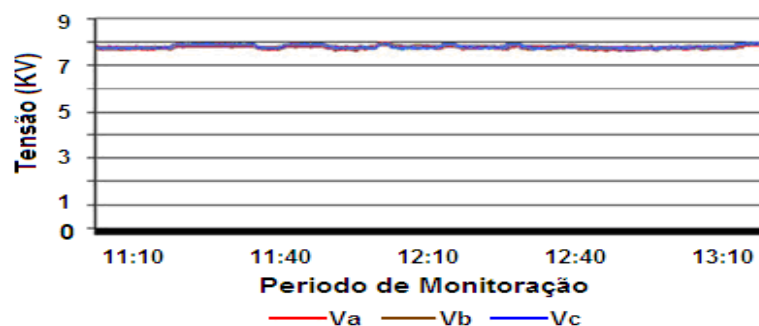


Figura 4.26 – Espectro de frequência dos valores eficazes de Tensão do ponto M5.

Tabela 4.26 – Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M5.

Tensão	Van [V]	Vbn [V]	Vcn [V]
Máximo	7949,91	7906,47	7955,75
Médio	7804,06	7767,61	7793,83
Mínimo	7683,06	7647,87	7652,47
P95%	7904,20	7863,30	7905,04

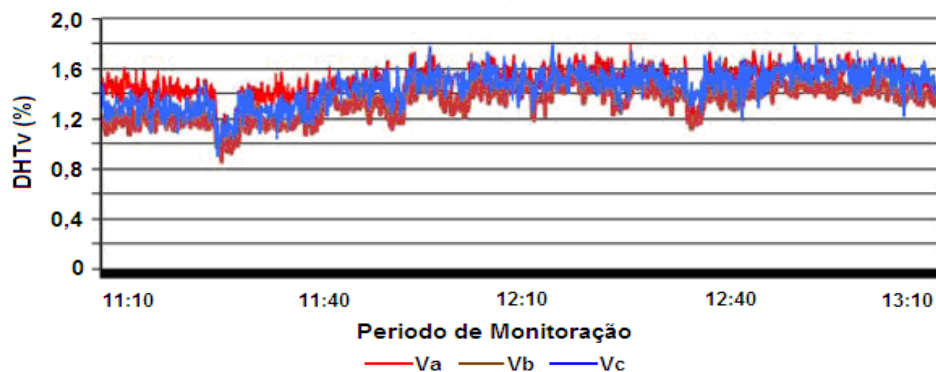


Figura 4.27 – Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro do ponto M5.

Tabela 4.27 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões

Tensão	V _{an} [%]	V _{bn} [%]	V _{cn} [%]
Máximo	1,80	1,65	1,81
Médio	1,50	1,35	1,45
Mínimo	0,95	0,87	0,91
P95%	1,67	1,53	1,66

Tabela 4.28 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M5.

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
3	0,00	0,14	0,53	0,33
5	0,66	1,14	1,52	1,38
7	0,01	0,16	0,37	0,28
9	0,00	0,10	0,47	0,23
11	0,04	0,45	0,73	0,61
13	0,06	0,29	0,51	0,41
15	0,00	0,08	0,24	0,15
17	0,00	0,12	0,30	0,22
19	0,00	0,12	0,34	0,23
21	0,01	0,31	0,58	0,50
23	0,00	0,16	0,42	0,31
25	0,00	0,10	0,29	0,20

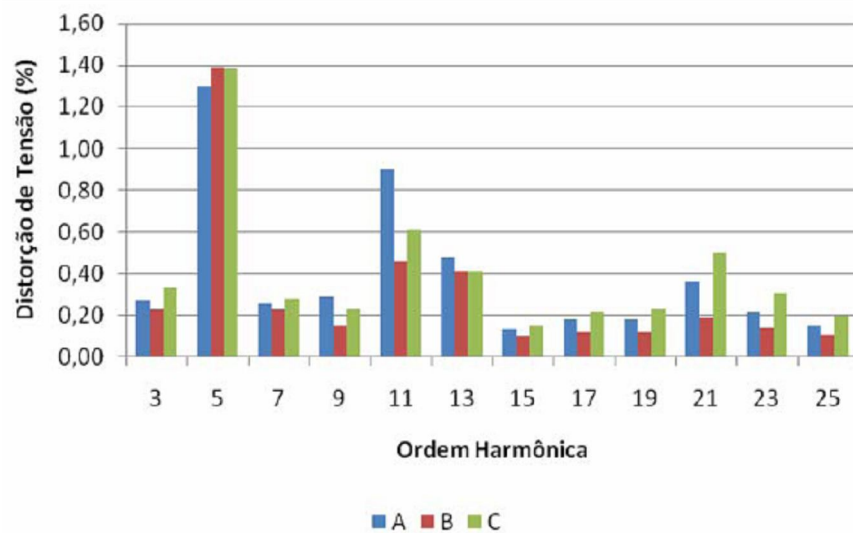


Figura 4.28 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão

Pela análise das distorções de tensão no ponto de medição M5, com relação aos Valores eficazes de tensão a barra atende ao estabelecido na resolução da ANEEL no 505/2001 que é de 0,93 (7,41 kV) a 1,05 (8,36 kV) pu.

Em relação aos harmônicos de tensão, a distorção ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma visto que a DHT é de 1,66 %, bem abaixo do permitido pela norma que é de 6%. O harmônico mais importante é o 5º com um valor de 1,38% (5º harmônico), sendo que até 3% é permitido.

Com base avaliação realizada o ponto de medição M5 está de acordo com o estabelecido nas normas referentes as distorções harmônicas e os limites de tensão.

4.7.2 Análise das Correntes

A Figura 4.29 mostra os perfis trifásicos das correntes de linha no ponto sob análise. O eixo vertical é auto-explicativo, enquanto que o horizontal corresponde ao tempo de monitoração.

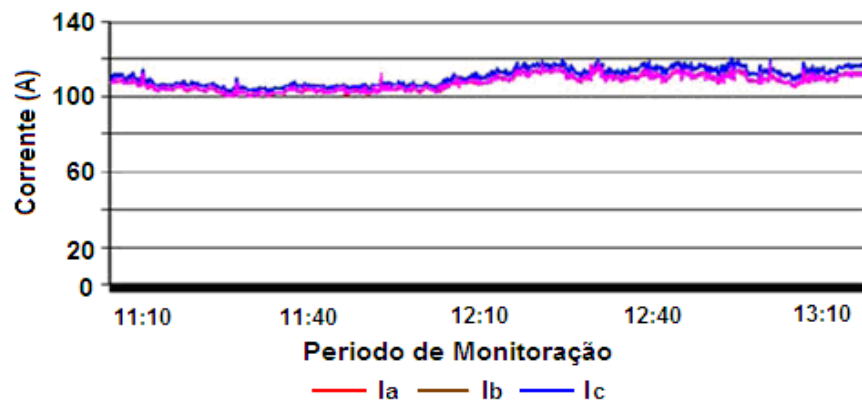


Figura 4.29 – Perfil da corrente de linha para o ponto M5.

Tabela 4.29 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficazes do ponto M5.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ia [A]
Máximo	117,70
Médio	107,54
Mínimo	99,95
P95%	113,91

O presente conjunto de resultados retrata o comportamento das distorções harmônicas de corrente do ponto M5.

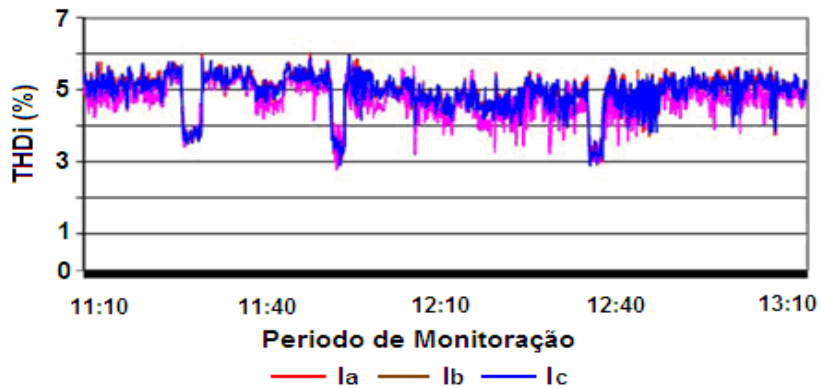


Figura 4.30 – Perfil da distorção harmônica total das correntes de linha do ponto M5.

Tabela 4.30 – Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M5.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO	
Corrente	Ic [%]
Máximo	6,01
Médio	4,97
Mínimo	2,92
P95%	5,58

Tabela 4.31 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M5.

Distorção Harmônica Individual de Corrente - Fase C				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
3	0,01	0,22	0,74	0,43
5	1,21	1,85	2,49	2,20
7	0,23	0,88	1,47	1,21
9	0,01	0,34	2,20	0,94
11	0,36	2,99	4,40	3,75
13	1,32	3,07	3,98	3,64
15	0,00	0,19	0,65	0,41
17	0,13	0,65	1,08	0,88
19	0,01	0,23	0,55	0,40
21	0,01	0,26	0,65	0,44
23	0,02	0,48	1,00	0,78
25	0,00	0,19	0,49	0,34

De posse dos resultados, a Figura 4.31 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de corrente obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

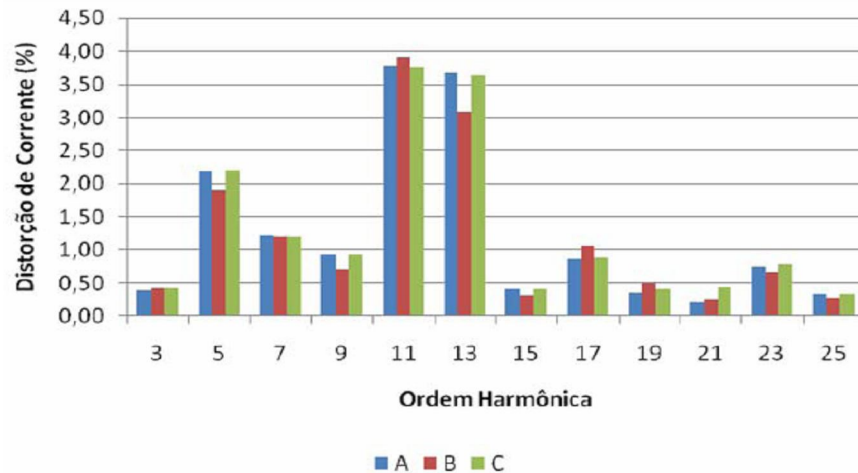


Figura 4.31 – Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M5.

Analisando das distorções de corrente no ponto de medição M5 e considerando que a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental medida é de 137,18 observa-se que os harmônicos mais significativos foram os 11º e o 13º ordens alcançando os valores de 3,75% e 3,64% respectivamente, e a norma define os limites para estes dois harmônicos em 4,5%. A DTD deste ponto de medição é de 5,97% enquanto que o limite aconselhável é de 12%. Sendo assim, este ponto de medição está de acordo com a norma.

4.8 Ponto de Medição M6 – Ponto de Entrega em 230kV

As medições realizadas neste ponto ocorreram entre as 12h02min do dia 04/07/2008 até às 16h33min do dia 04/07/2008. Assim como os demais, o presente conjunto de resultados retrata o comportamento das distorções harmônicas de tensão durante o período de monitoração. Assim sendo, os tópicos listados na seqüência sintetizam os registros em gráficos e tabelas, permitindo, assim, uma análise global do sistema no ponto M6.

4.8.1 Análise das Tensões

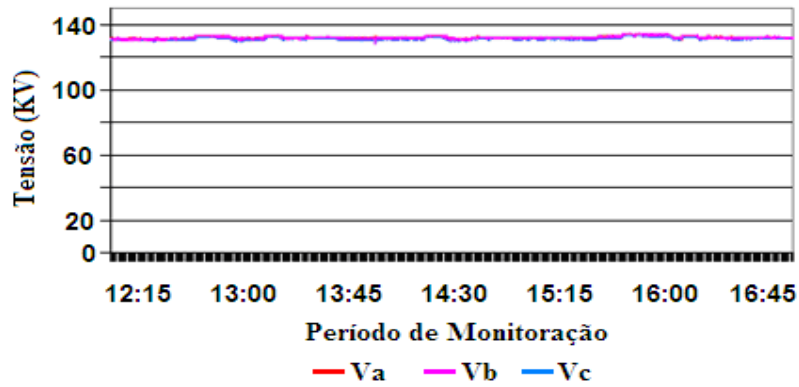


Figura 4.32 – Perfil das tensões fase-neutro valores eficazes do ponto M5.

Tabela 4.32 – Valores estatísticos das tensões eficazes do ponto M5.

Tensão	V _{an} [V]	V _{bn} [V]	V _{cn} [V]
Máximo	134.981,83	133.961,09	134.875,96
Mínimo	130.341,74	128.399,93	128.670,37
Médio	132.412,35	131.522,16	132.337,25
P95%	133.983,07	133.034,50	134.009,88

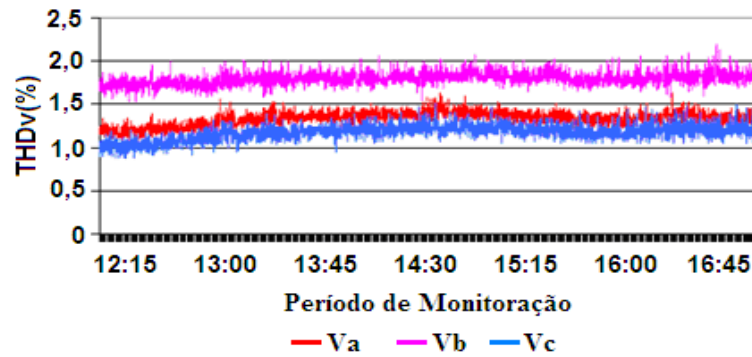


Figura 4.33 – Perfil das distorções harmônicas totais das tensões fase-neutro do ponto M5.

Tabela 4.33 – Valores estatísticos das distorções totais das tensões do ponto M5.

Tensão	V _{an} [%]	V _{bn} [%]	V _{cn} [%]
Máximo	1,62	1,50	2,19
Mínimo	1,05	0,87	1,53
Médio	1,33	1,17	1,79
P95%	1,45	1,30	1,91

Tabela 4.34 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% das distorções individuais de tensão do ponto M5.

Distorção Harmônica Individual de Tensão				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
2	0	0,11	0,61	0,21
3	0,92	1,35	1,67	1,47
4	0	0,07	0,33	0,15
5	0,74	1,01	1,3	1,13
7	0,05	0,25	0,52	0,34
11	0	0,12	0,38	0,22
13	0	0,12	0,46	0,23
15	0,06	0,26	0,52	0,35

De posse dos resultados, a Figura 4.34 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de tensão obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

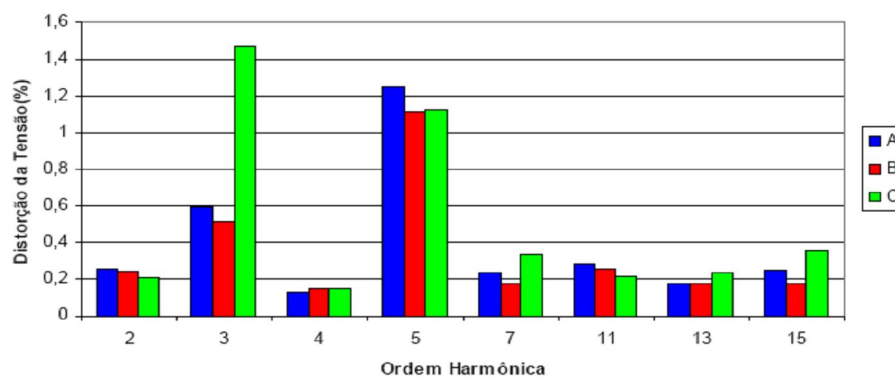


Figura 4.34 – Espectro de frequência dos valores P95% da tensão do ponto M5.

Analisando das distorções de tensão no ponto M6, com relação aos valores eficazes de tensão, a barra atende ao estabelecido na resolução da ANEEL no 505/2001 que é de 0,93 (123,5 kV) a 1,05 (139,4 kV) pu.

Em relação aos harmônicos de tensão, a distorção ficou dentro dos limites estabelecidos pela norma. A DHT foi de 1,91% e a norma estabelece o valor de 3%. O mesmo ocorrendo para as distorções individuais sendo o maior valor medido o valor de 1,47% e 1,13% (3º e 5º harmônico respectivamente) sendo que até 2% é permitido segundo os Procedimentos de rede em seu submódulo 2.8.

4.8.2 Análise das Correntes

A Figura 4.35 mostra os perfis trifásicos das correntes de linha no ponto sob análise. O eixo vertical é auto-explicativo, enquanto que o horizontal corresponde ao

tempo de monitoração. Do mesmo modo que para os registros das tensões, deve-se entender que cada amostra implica em intervalos de 5 segundos.

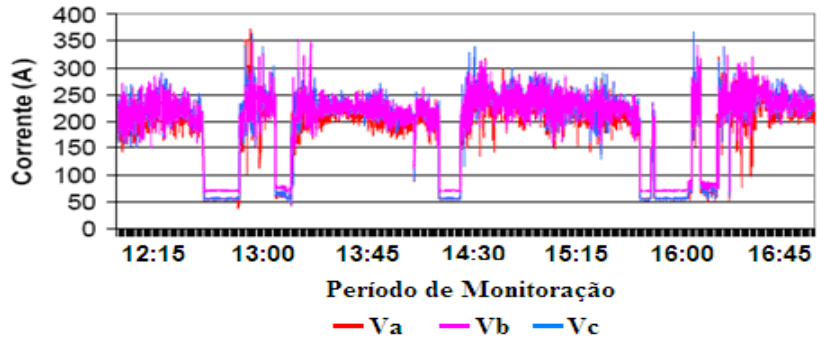


Figura 4.35 – Perfil da corrente nas fases valores eficazes do ponto M5.

Tabela 4.35 – Valores máximos, mínimos, médios e P95% da corrente eficazes.

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO			
Corrente	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]
Máximo	373,88	367,36	353,46
Mínimo	35,67	42,4	64,36
Médio	184,5	195,33	196,32
P95%	257,45	266,05	265,84

O presente conjunto de resultados retrata o comportamento das distorções harmônicas de corrente .

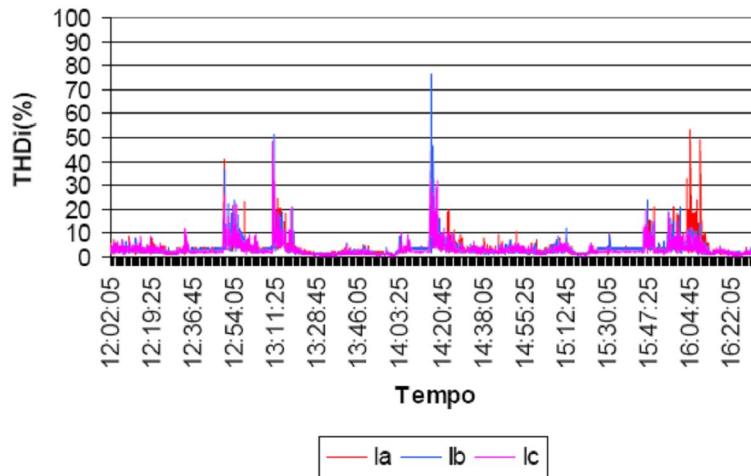


Figura 4.36 – Perfil da distorção harmônica total da corrente do ponto M5.

Tabela 4.36 – Valores estatísticos da distorção total de corrente do ponto M5..

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO			
Corrente	Ia [%]	Ib [%]	Ic [%]
Máximo	53,73	76,87	48,94
Mínimo	1,00	0,97	0,75
Médio	3,90	3,57	3,34
P95%	9,55	8,7	8,36

Tabela 4.37 – Valores mínimos, máximos, médios e P95% das distorções individuais de corrente do ponto M5.

Distorção Harmônica Individual da Corrente				
Ordem Harmônica	Mínimo (%)	Médio (%)	Máximo (%)	P95 (%)
2	0,01	1,48	45,43	5,73
3	0,01	1,35	26,28	3,78
4	0	0,54	11,39	1,87
5	0,24	1,69	8,9	3,12
7	0	0,53	4,5	1,44
11	0	0,25	3,13	0,64
13	0	0,2	3,26	0,53
15	0,01	0,25	2,25	0,64

De posse dos resultados, a Figura 4.37 apresenta uma síntese dos valores P95% das distorções individuais de corrente obtidas ao longo do tempo de monitoração na forma de espectro de frequências.

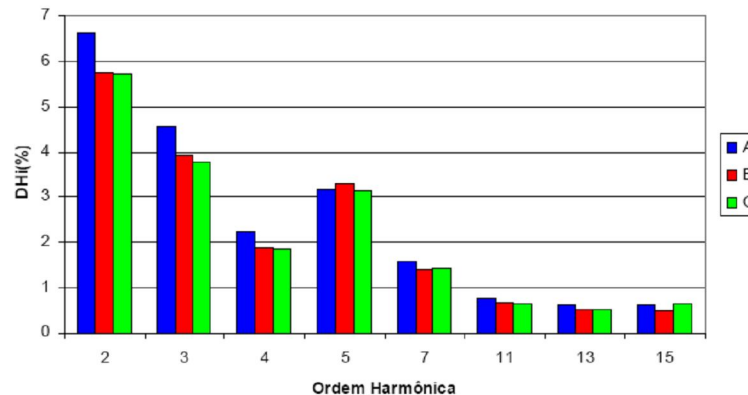


Figura 4.37 – Espectro de frequência dos valores P95% da corrente do ponto M5.

Pela análise das distorções de corrente no ponto de medição M6, considerando que a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente fundamental do sinal medido é de 36,6, observa-se que o 2º, 3º, e 5º harmônicos alcançaram os valores de 5,73%, 3,78% e 3,12% respectivamente ultrapassando o limite de 2% estipulado pelo guia IEEE 519. As

outras componentes harmônicas estão dentro do recomendado. A DHT_i deste ponto de medição é de 8,3%, enquanto que o limite aconselhável é de 2,5%.

Quanto ao fator de potência, as potências ativa e reativa da instalação medidos foram de 83,11 MW e 36,39 MVar respectivamente, proporcionando um fator de potência (fp) de 0,916, tabela 4.41.

Tabela 4.38 – Fator de potência dos pontos de medição

Ponto da Instalação	Fator de Potência (fp)
M1	0,951
M2	0,932
M3	0,447
M4	0,808
M5	0,909
M6	0,916

O fator de potência está abaixo do limite mínimo recomendado. Então faz-se necessário sua correção.

4.9 Conclusões Gerais

A partir das análises realizadas observa-se que o sistema elétrico opera com os limites de distorção harmônica de tensão atendendo as recomendações do ONS. Na entrada da subestação, as distorções harmônicas de tensão variam de 1,3% a 1,91%, sendo que o limite é 3%. Em relação aos níveis de tensão eficaz existem, dois pontos que merecem uma atenção especial. O secundário dos transformadores da laminação e do forno EBT apresentam tensão eficaz acima dos limites preestabelecidos. Isto se dá pelo fato de ambos possuírem filtros para minimizar as distorções harmônicas sem chaveamento do banco de capacitores. A potência reativa aplicada pelos filtros não possuem mecanismos de controle da potência aplicada, disponibilizando toda sua potência com a planta operando ou não. Nos momentos em que os equipamentos param por algum tipo de interrupção, a tensão excede aos limites recomendados pelo Operador Nacional do Sistema. O forno Painela, a Redução Direta e a Usina não apresentaram qualquer tipo de problema.

As limitações são realizadas para a tensão. Observa-se principalmente um desequilíbrio no Forno EBT proveniente da não-linearidade de sua operação. Apesar dos filtros e bancos de capacitores existentes, as distorções estão acima do recomendado pelo guia IEEE-519.

Em relação ao fator de potência, observa-se a necessidade de inserir uma compensação reativa de forma que a empresa possa operar em condições aceitáveis pela Procedimentos de Rede.

Dessa forma, a empresa opera dentro dos limites estipulados pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede com relação às distorções harmônicas de tensão sem causar danos à concessionária ou aos consumidores conectados a este ponto.

5 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO

Após a análise do capítulo 4 observa-se que a instalação elétrica industrial analisada está operando dentro dos limites estipulados pela legislação brasileira em relação as distorções harmônicas. No entanto, o fator de potência da instalação está no limite de 0,916 , então será realizada a simulação afim de avaliar a possibilidade de aumentar este fator de potência e analisar o que este acréscimo de potência reativa irá interferir no comportamento deste sistema.

O modelo do sistema elétrico da Figura 4.1 foi implementada em Simulink/Matlab utilizando blocos existente nesta ferramenta computacional aliada a informações dos equipamentos da planta e as medições realizadas.

5.1 Modelo do Sistema Elétrico do Consumidor Industrial

A planta é interligada a CHESF (Companhia HidroElétrica do São Francisco) através da Subestação de Cotegipe em que o fornecimento de energia elétrica se dá através de uma linha de transmissão de aproximadamente 10 Km.

A partir da Subestação principal da Usina a energia elétrica é distribuída para as demais áreas. A medição realizada para analisar as distorções causadas pela operação da planta ocorreu no secundário dos transformadores que alimenta as cargas do Forno Panela, Forno EBT, Laminação, Redução e Usina. O Forno EBT está conectada a uma tensão de 32 kV e as demais cargas estão conectadas em 13,8 kV. A medição da entrada da Subestação de 230 kV foi realizada na Subestação de Cotegipe.

A Figura 5.1.a mostra o modelo do sistema simulado. Da esquerda para a direita, estão representados o modelo equivalente da subestação de Cotegipe e da linha de transmissão ligando esta subestação à subestação principal da planta a ser simulada.

A subestação de Cotegipe foi modelada por uma fonte de tensão e sua impedância de curto-circuito. A linha de transmissão ligando a subestação de Cotegipe à subestação na planta a ser simulada foi modelada por parametros concentrados, já que a mesma pode ser considerada como uma linha curta.

Logo em seguida estão os transformadores do forno EBT e do forno Panela, onde ocorrem a fusão e o refino do aço respectivamente. No secundário destes transformadores

estão representados a impedância dos cabos de conexão e a carga. A carga possui componentes de frequência fundamental e harmônicos. Assim, a carga foi modelada por resistores representando a potência ativa consumida na frequência de 60Hz, indutores ou capacitores representando a potência reativa consumida na frequência de 60Hz e fontes de corrente representando os harmônicos presentes na corrente de carga dos fornos EBT e Panela.

Na Figura 5.1.b é apresentado o restante da planta formado pelas cargas da área de Laminação, Usina e Redução Direta.

A coleta de dados deveria ser feita durante um período de um dia e ao longo de 7 dias consecutivos, mas infelizmente devido a indisponibilidade do equipamento para a realização destas medidas isto não pode ser feito. Cada ponto foi monitorado durante um período de 12 horas e os valores utilizados para a modelagem foram os valores P95% obtidos a partir desta coleta de dados.

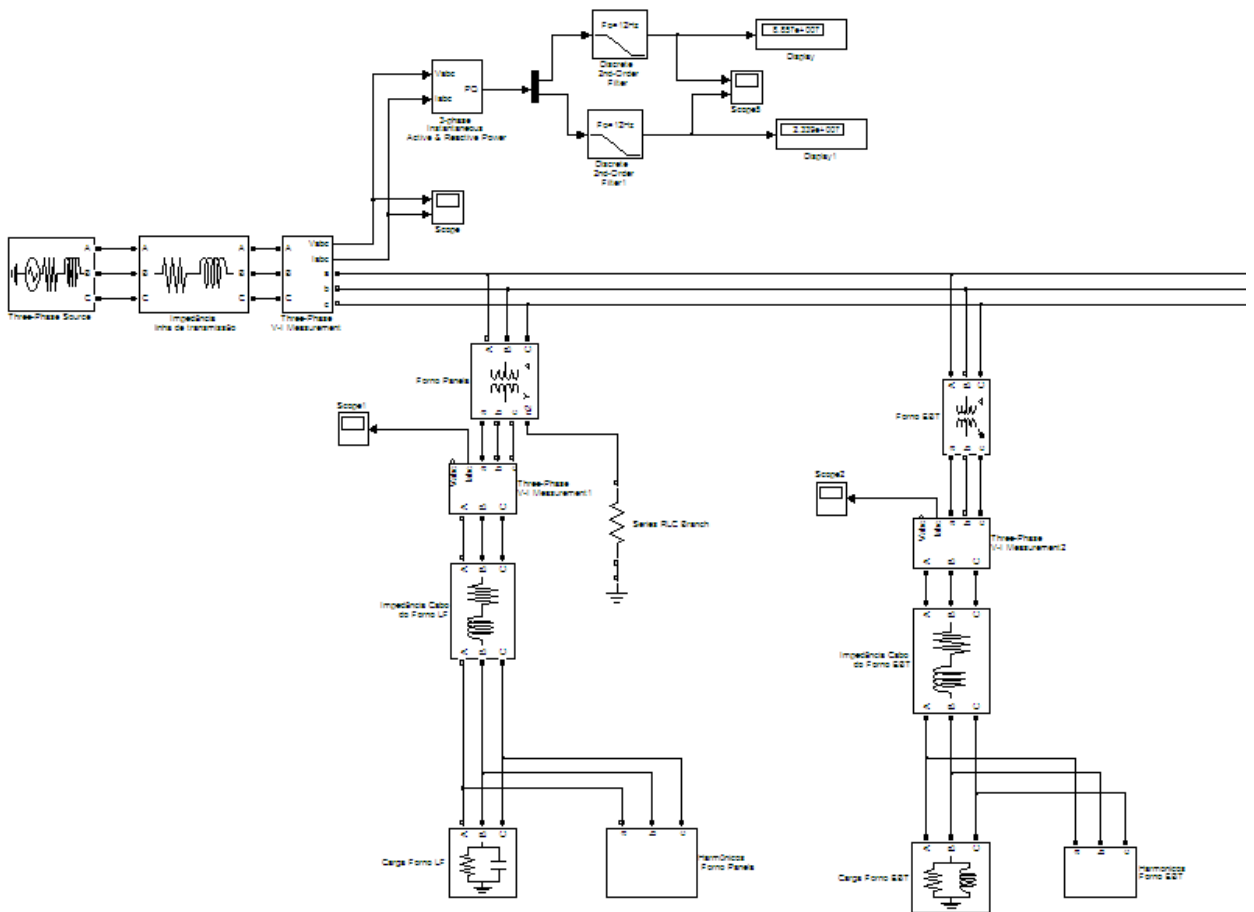


Figura 5.1.a – Modelo do Sistema Elétrico: Alimentação da Chesf, Forno Panela e Forno EBT .

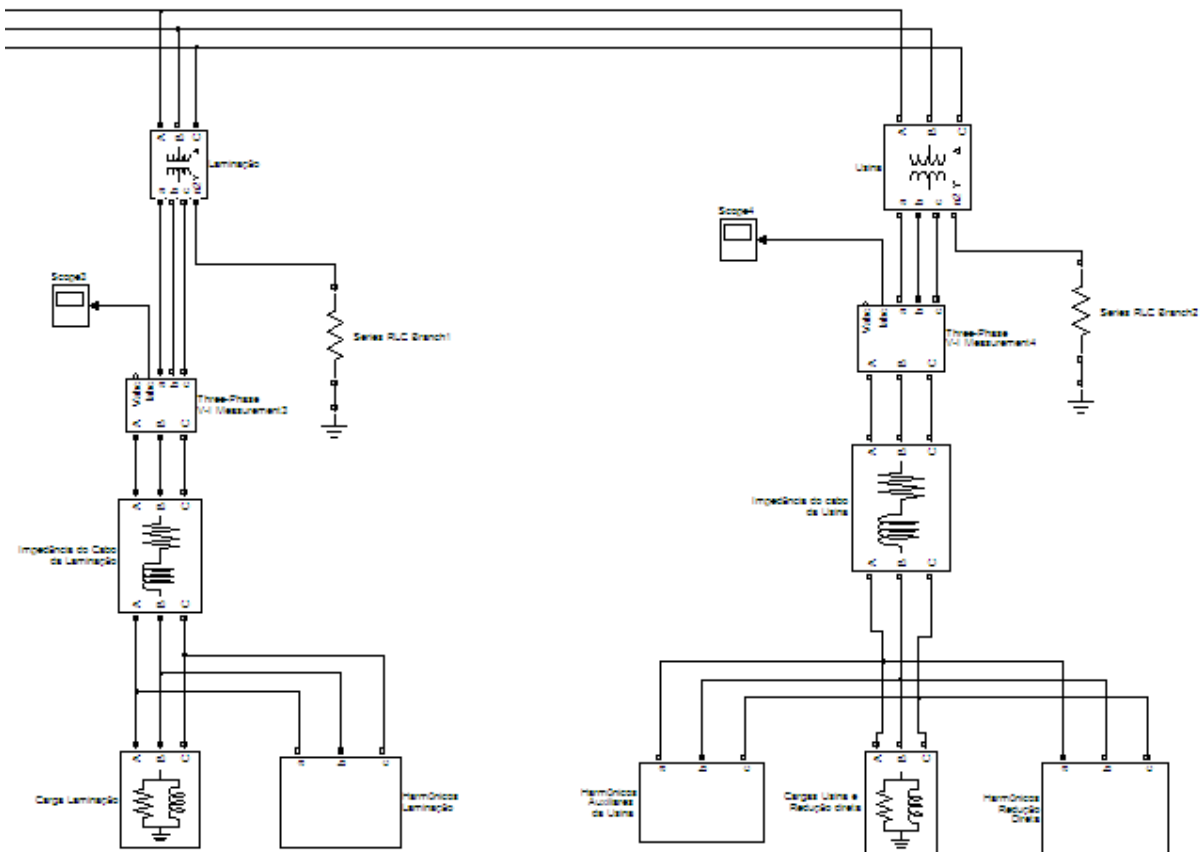


Figura 5.1.b – Modelo do Sistema Elétrico: Laminação, Usina e Redução Direta .

5.2 Simulação do Sistema Elétrico

Após a modelagem do sistema procedeu-se com a simulação. Os resultados obtidos a partir da simulação são comparados com as medições relacionadas nas tabelas 5.2 a 5.6.

Tabela 5.1 – Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta o Forno Panela.

Forno Panela		
Grandeza	Medido	Simulado
V_{rms}	7,98 a 8,03 KV	7,82 KV
I_{rms}	504 A	482 A
THD_v	1,41 a 1,48 %	0,93%
THD_i	11,61%	11%
P_{Ativa}	10,07 MW	9,75 MW
$P_{Reativa}$	- 3,0 MVar	-3,5 MVar
fP	0,890	0,906

Tabela 5.2 – Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta o Forno EBT.

Forno EBT		
Grandeza	Medido	Simulado
V_{rms}	25,10 KV	26,80 KV
I_{rms}	1296,13 A	1195 A
THD_v	4,64 %	0,93%
THD_i	12,33%	9,06%
P_{Ativa}	57,56 MW	60,20 MW
$P_{Reativa}$	22,44 MVAr	23,92 MVAr
fP	0,932	0,929

Tabela 5.3 – Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta a Laminação.

Laminação		
Grandeza	Medido	Simulado
V_{rms}	8,48 a 8,55 KV	8,18 KV
I_{rms}	422,16 A	458,8 A
THD_v	2,86 %	0,93 %
THD_i	6,59 %	4,18 %
P_{Ativa}	4,81 MW	10,07 MW
$P_{Reativa}$	9,62 MVAr	5,05 MVAr
fP	0,447	0,448

Tabela 5.4 – Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta a Redução Direta

Usina		
Grandeza	Medido	Simulado
V_{rms}	7,94 a 8,02 KV	8,15 KV
I_{rms}	429,84 A	460 A
THD_v	1,39 a 1,49 %	0,96%
THD_i	2,01%	1,27%
P_{Ativa}	8,69 MW	9,1 MW
$P_{Reativa}$	6,344 MVAr	6,65 MVAr
fP	0,808	0,807

Tabela 5.5 – Valores Medidos e simulados no secundário do transformador que alimenta a Usina.

Redução Direta		
Grandeza	Medido	Simulado
V_{rms}	7,86 a 7,90 KV	8,15 KV
I_{rms}	113,91 A	101,5 A
THD_v	1,53 a 1,67 %	0,96 %
THD_i	5,58%	4,57%
P_{Ativa}	2,16 MW	2,26 MW
$P_{Reativa}$	0,98 MVAr	1,02 MVAr
fP	0,909	0,911

Tabela 5.6 – Valores Medidos e simulados na barra de entrada da Subestação Principal.

Entrada 230KV		
Grandeza	Medido	Simulado
V_{rms}	133,03 a 134 KV	130,7 KV
I_{rms}	257,45 a 266,05 A	241,3 A
THD_v	1,3 a 1,91 %	0,94%
THD_i	8,36 a 9,55%	7,47%
P_{Ativa}	83,29 MW	80,06 MW
$P_{Reativa}$	36,39 MVar	34,5 MVar
fP	0,916	0,918

Observa-se que os resultados obtidos a partir da simulação do sistema elétrico está próximo dos valores medidos. A discrepância entre estes valores são aceitáveis e são provenientes de limitações da modelagem, uma vez que é um modelo simplificado de um sistema elétrico de uma planta siderúrgica.

Com base nos resultados de medição e simulação apresentados observa-se que o fator de potência é de 0,918. A operação do sistema muito próximo deste limite pode acarretar multas para a empresa, sendo assim, será projetado um banco de capacitores para aumentar o fator de potência.

5.3 Cálculo do Banco de Capacitores

As potências ativa e reativa média da entrada da Subestação são:

$$P = 80,06 \text{ MW} \text{ e } Q = 34,59 \text{ MVAR}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(80,06 \cdot 10^6)^2 + (34,59 \cdot 10^6)^2} = 87,2 \text{ MVA} \quad (5.1)$$

$$fP = \left(\frac{P}{S} \right) = \left(\frac{80,06}{87,2} \right) = 0,918 \quad (5.2)$$

O fator de potência desejado (desprezando a THD) será de:

$$FP = 0,95$$

Pode-se determinar a potência reativa necessária para a obtenção do fator de deslocamento desejado:

$$Q_f = P \cdot \tan(a \cos(fP)) = 80,06 \times 10^6 \cdot \tan(a \cos(0,95)) = 26,31 \text{ MVar} \quad (5.3)$$

De posse desta informação, calcula-se a potência reativa capacitiva necessária para compensar a potência reativa indutiva em excesso na “planta”.

$$Q_c = Q_{1\phi} - Q_f = 34,59\text{MVar} - 26,31\text{MVar} = 8,27\text{MVar} \quad (5.4)$$

Foi realizado um estudo de resposta em frequência do sistema com a inclusão do banco de capacitores a partir do diagrama unifilar da Figura 5.2. Após a simulação percebeu-se que, ao acrescentar a potência necessária para o ajuste do fator de potência foi criada uma ressonância próximo ao 10º harmônico, como mostrado na Figura 5.3 .

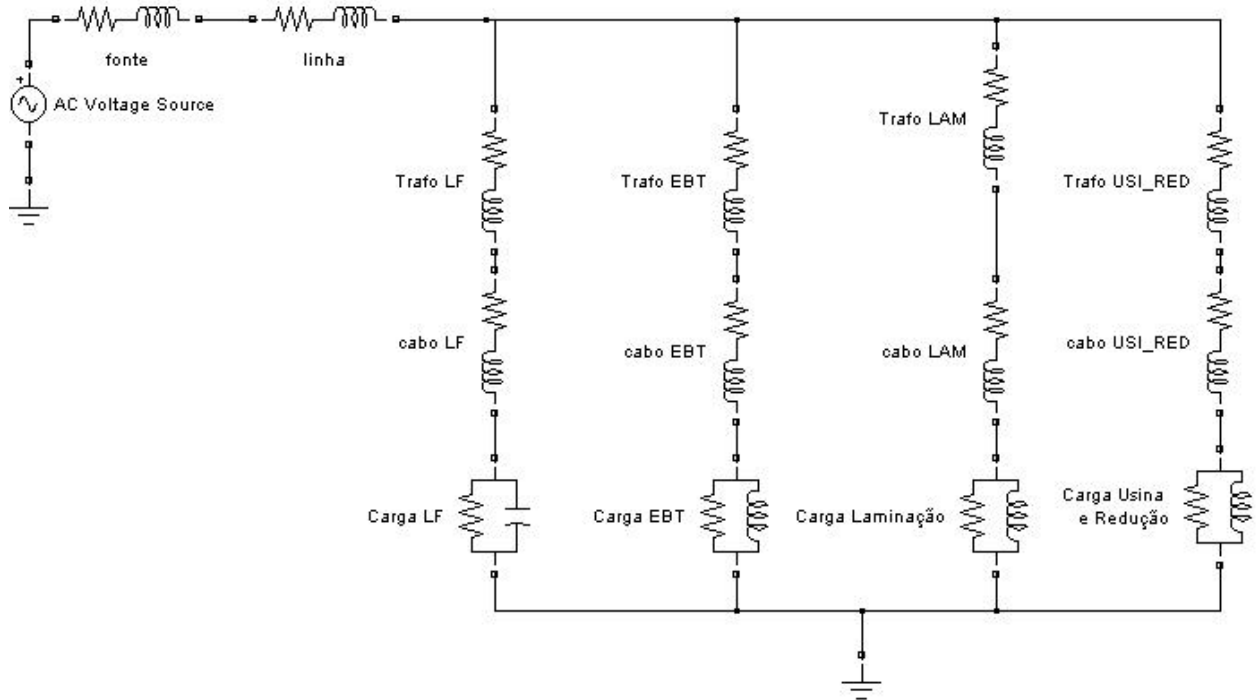


Figura 5.2 – Modelo do diagrama Unifilar do Sistema Elétrico.

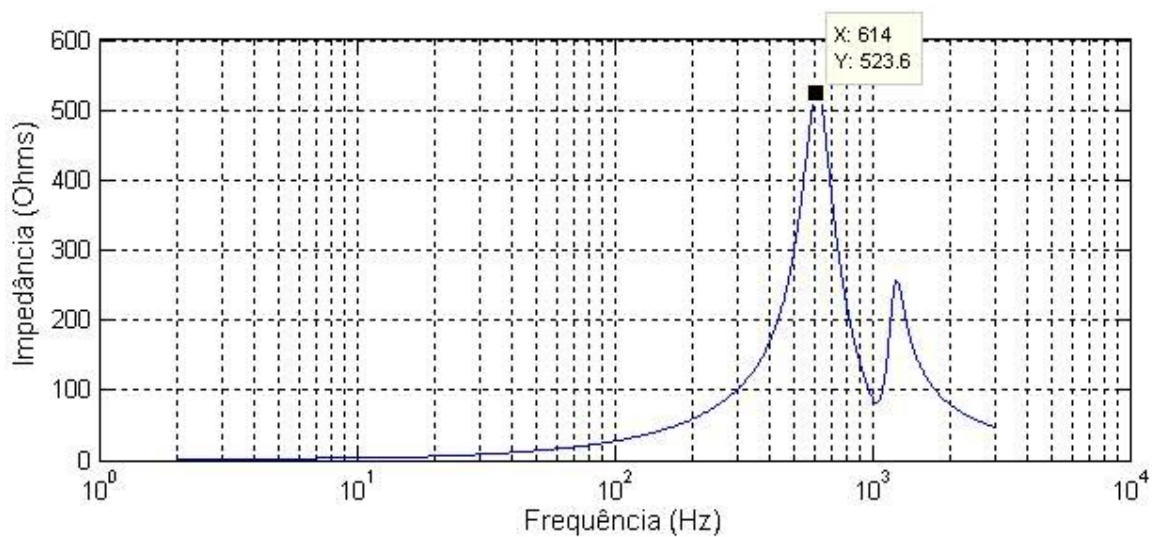


Figura 5.3: Resposta em frequência do sistema com a inserção do banco de capacitores.

Considerando-se que o 10º harmônico não é um harmônico característico não existe a necessidade da instalação de um filtro anti-ressonante nesta frequência.

5.4 Conclusões Gerais

Este capítulo apresentou a modelagem e a simulação do sistema elétrico analisado. Observa-se que o modelo aproximou-se bastante dos valores medidos. Obteve-se um valor de THD_v na entrada da Subestação de 0,93% e THD_i de 7,13% na simulação enquanto que os valores medidos variaram de 1,3% a 1,9% e 8,3% a 9,55% respectivamente.

O modelo foi importante para realizar testes e identificar as possibilidades de permitir que o sistema possa operar em uma faixa segura de operação ajustando o fator de potência de 0,918 para 0,95.

Para este ajuste foi necessário inserção de um banco de capacitores de 8,27 MVAR que causou uma ressonância na frequência da 10ª harmônica.

Na inclusão de banco de capacitores em uma planta industrial, pode aparecer o efeito de ressonância no sistema como visto na simulação apresentada. Logo, apesar do projeto do banco de capacitores ser feito de forma isolada, sem levar-se em conta a provável interação da capacitância do sistema e os parâmetros da rede, é importantíssima a etapa de simulação. Esta simulação evita surpresas na hora da instalação dos mesmos na indústria e permite ao projetista a oportunidade de refazer o projeto na ocorrência de algum problema visível.

Ao se calcular o banco de capacitores é importante ter em mente valores comerciais de capacitores. Caso o valor calculado não coincida com aqueles oferecidos pelo comércio, adota-se o valor comercial mais próximo de capacitância.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma avaliação completa da situação atual de um grande consumidor industrial com relação às Distorções Harmônicas de Tensão e de Corrente. Além desta avaliação também foi implementada a modelagem computacional do sistema considerando a injeção harmônica devido as cargas presentes na planta.

Foram apresentados os indicadores responsáveis pela análise das distorções harmônicas, além do efeito de determinados equipamentos com cargas não lineares na operação do sistema. A partir das recomendações do Procedimentos de Rede em seu submódulo 2.8 foi possível avaliar a situação atual da empresa.

A empresa está a mais de 30 anos instalada no local e nunca apresentou nenhum tipo de problema atribuído à geração de harmônicos. Mas em função da alteração das cargas instaladas, substituição de equipamentos e da possibilidade de expansão da empresa fez-se necessário este estudo.

A Distorção Harmônica Total de Tensão para os pontos medidos são aceitáveis. Em alguns casos é necessário apenas a correção da tensão eficaz da barra. Em momentos do dia em que a indústria se apresenta com poucas cargas conectadas à rede elétrica, há a necessidade de desligamento dos filtros e banco de capacitores (de forma total ou parcial), evitando desta forma que a indústria se apresente com característica capacitiva perante a concessionária.

Para as Distorções Harmônicas de Corrente, observa-se um desequilíbrio do sistema em análise devido ao valor da componente harmônica de 2^a ordem. Isto se deve pela operação de um forno a arco de 70MVA que possui uma carga extremamente não linear. Mas apesar disso, não causou na tensão uma influência que necessitasse de correção.

A modelagem de cargas harmônicas através de fontes de corrente, por sua vez, foi validada através das comparações entre as medições em campo e simulações realizadas, sendo apta à modelagem harmônica das cargas a partir de dados de medição.

A inserção de um banco de capacitores fez-se necessária para deslocar o fator de potência para um patamar que garanta uma operação segura da planta, evitando multas pela concessionária. Após a inserção do banco de capacitores foi gerada uma ressonância

na frequência de 600Hz. Observou-se que não era um harmônico característico e não possuía uma amplitude considerável que necessitasse de correção.

Como trabalhos futuros podem ser propostos:

- ✓ Inclusão de um sistema de controle que possa monitorar a carga utilizada e em função desta avaliação desligar os filtros e/ou bancos de capacitores para evitar uma sobretensão no sistema nos momentos de baixo consumo de energia;
- ✓ Modelagem do sistema considerando a sua expansão com uma nova configuração de potência instalada. Para esta nova potência instalada será necessária uma reavaliação dos filtros existentes;
- ✓ Simular a inclusão de filtros ativos no alimentador primário e comparar as reduções harmônicas com os resultados obtidos com filtros passivos. Tal comparação permitirá também analisar a relação custo/benefício entre estas duas tecnologias de filtros harmônicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MORÁN, L. A.; DIXON, J. W.; ESPINOZA, J. R.; WALLACE, R. R. Using Active Power Filters to Improve Power Quality. *Proc. of COBEP '99*, 1999, p. 501-511.
- [2] NASCIMENTO, C. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. A. Compensation of the Harmonic Current Generated by Light Dimmers. *VI Induscon*, 2004.
- [3] NASCIMENTO, C. F. Determinação do Conteúdo Harmônico de Corrente Baseada em Redes Neurais Artificiais para Cargas Não-Lineares Monofásicas. 2007. 202p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [4] PAICE, D. A., “Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power”, 1st. Edition, IEEE Press, New York, 1996.
- [5] ARRILLAGA, J. et al. Power System Harmonics. Chichester, J. Wiley, c 1985,.
- [6] SASAKI, H.; MACHIDA, T., “A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents By Magnetic Flux Compensation – Considerations on Basic Design”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, N° 5, pp. 2009-2019, Sept/Oct 1971
- [7] LAWRENCE W. B., “Michalic, G. Mielczarski, W Szczepanik, J., “Reduction of Harmonic Pollution in Distribution Networks”, IEEE Catalogue N°. 95TH8130, pp. 198-202, 1995.
- [8] KEY, T., LAY, J-S., “Analysis of Harmonic Mitigation Methods for Building Wiring Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, N° 3, pp. 890-897, Aug. 1998.
- [9] ALVES, A. C. B., “Análise de Problemas e Procedimentos na Terminação de Filtros Harmônicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1991.
- [10] AKAGI, H.; “Active Harmonic Filters”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, N° 12, pp. 2128-2141, Dec.2005.
- [11] AREDES, M., WATANABE, E. H., “Power Quality Considerations on Shunt/Series Current And Voltage Conditioners”. 10th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 2, pp. 595 - 600, 2002.

- [12] AKAGI, H.; “New Trends in Active Filters for Power Conditioning”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, N°. 6, pp. 1311-1322, Nov./Dec. 1996.
- [13] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
- [14] IEEE C57.110-1998 – PES Transformer Committee, *Recommended Practices for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*.
- [15] MELLO, C. A. F., *Efeitos das Tensões e Correntes Harmônicas sobre o Sistema Elétrico e seus Componentes*, Dissertação de Mestrado n° 51, PPGEE, UFMG,1988.
- [16] BARBOSA, M. A., *Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos Industriais*, Dissertação de Mestrado n° 53, PPGEE, UFMG,1988.
- [17] Moore, A. H., “Harmonics”. In: MILLER, T. J. E. *Reactive Power Control in Electric Systems*. New York, IEEE J. Wiley, 1982, p. 331 – 51.
- [18] DUGAN, R.C., *Electrical Power Systems Quality*, second edition, McGraw-Hill, 2002.
- [19] FOULADGAR, J., CHAUVEAU, E., *The Influence of the Harmonics on the Temperature of Electrical Machines*, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, n°5, 2005.
- [20] DIAS, G. A. D., *Harmônicas em Sistemas Industriais*, segunda edição, EDIPUCRS, 1998.
- [21] ANDREAS, J. C., *Energy-Efficient Electric Motors: Selection and Application*, pp. 176, GOULD – Electronics & Electrical Products, 1982.
- [22] BOLLEN, M. H. J., *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press Series on Power Engineering, New York, 1999.
- [23] DELAIBA, A. C., *The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life*, 38th Midwest Symposium on Circuits and System, vol. 1, p.p. 933-936, Rio de Janeiro, 1995.
- [24] ORAEE, H., *A Quantitative Approach to Estimate the Life Expectancy of Motor Insulation Systems*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, n° 16, 2000.
- [25] NAVES, A. C., GARCIA, F.R., *Efeitos Harmônicos da Aplicação de Bancos de Capacitores em Indústrias Eletrointensivas sobre a Rede Elétrica de Alta Tensão – Casos*

Reais, VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE, 21-24 de Agosto de 2005, Belém, PA.

[26] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, *Procedimentos de Rede: Sub-Módulo 2.8 – Padrões de Desempenho da Rede Básica*, Rio de Janeiro, 2009.

[27] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, módulo 8, 16/12/2008 Resolução 345/2008 da ANEEL.

[28] NUNES, R. V., *Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP*. Dissertação de Mestrado, PPGEE/UFMG 2007.

[29] AINSWORTH J. D. “Filters, Damping Circuits and Reactive Volt Amperes in HVDC Convertors”. In: CORY, B. J. ed. *High Voltage Direct Current Convertors and Systems*. Macdonald, c 1965, London, p 137-174.

[30] ALVES, M. F. *Filtros Harmônicos*, Belo Horizonte, E.R. Equipamentos Elétricos de Alta Tensão Ltda., (Boletim Técnico ERE-BT-006).

[31] ALVES, M. F., Alcan Alumínios do Brasil S.A., *Análise de Harmônicos e de Comportamento de Bancos de Capacitores – Sistema Elétrico – Saramenha –Rancharia*. Belo Horizonte, 1984.

[32] KIMBARK, E.W., “Harmonics and filters”. In: *Direct Current Transmission*. New York, J. Wiley, 1971, Chapter 8, p. 295-289.

APÊNDICE A - EXEMPLO DE ESPECIFICAÇÃO DE FILTROS

Este exemplo de especificação de filtro foi extraído do relatório técnico [33] (ALVES, M. F., 1984). Após a apresentação deste exemplo foi realizada a simulação dos dados obtidos a partir da filtragem e posterior análise da eficiência dos filtros.

É considerado o sistema alimentador de um grande conversor (retificador) de potência instalada de 28,5 MW, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura A.1.

Este conversor é formado por quatro grupos retificadores de 6,5 MW devidamente defasados de 30° para operação com 12 pulsos e um quinto grupo retificador de 2,5 MW com operação em 6 pulsos, Figura 19. Logicamente, a composição de correntes harmônicas deve apresentar os harmônicos característicos para cada essas condições operacionais. A tabela A.1 apresenta as amplitudes dos harmônicos em relação a componente fundamental.

O sistema em análise é uma instalação industrial, para a qual estudos de fluxo de potência indicaram a necessidade de instalação de 10MVAR de capacitores para a correção do fator de potência. Esta é portanto a potência (frequência fundamental) a ser fornecida pelos filtros.

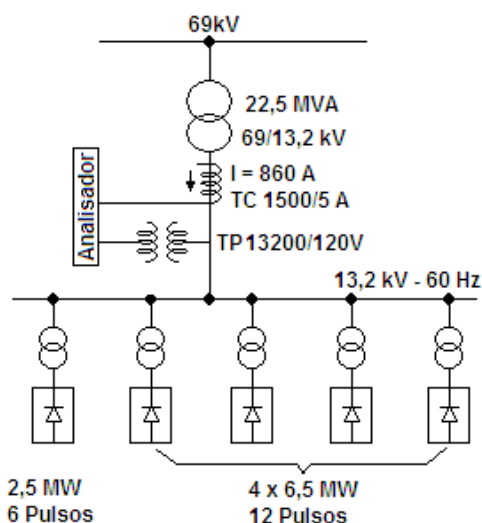


Figura A.1 – Diagrama unifilar do sistema industrial analisado.

Tabela A.1 – Distorções harmônicas do sistema em estudo.

ORDEM HARMÔNICA	1	3	5	7	11	13	17	19	23	25
Corrente em Amper	860	3,4	20,6	12,0	28,4	19,8	2,6	2,6	2,6	4,3
% da corrente fundamental	100	0,4	2,4	1,4	3,3	2,3	0,3	0,3	0,3	0,5

A.1 Análise de ressonância Harmônica

Em primeiro lugar é necessário verificar a resposta em frequência do sistema, para se analisar o problema da ressonância.

A análise da ressonância é geralmente conduzida em dois níveis. Realiza-se primeiro uma abordagem a nível analítico, válida somente nas condições de ressonância onde, então, o sistema pode ser simplificado representado pelo seu equivalente (impedância obtida a partir dos cálculos de curto circuito do sistema). Em seguida realiza-se uma análise via computador, com o sistema representado em detalhes, quando é possível analisar com precisão o comportamento de cada barra, para todo o espectro de frequência de ressonância. Nesta segunda parte do estudo, faz-se ainda um estudo de fluxo de correntes harmônicas, calculando-se então as distorções harmônicas nas várias barras do sistema.

Para o exemplo em questão, foi realizada a análise de ressonância harmônica via computador. O programa utilizado executa um fluxo de harmônicos, semelhante ao cálculo de fluxo de potência convencional. Os resultados obtidos são apresentados na Figura A.2.

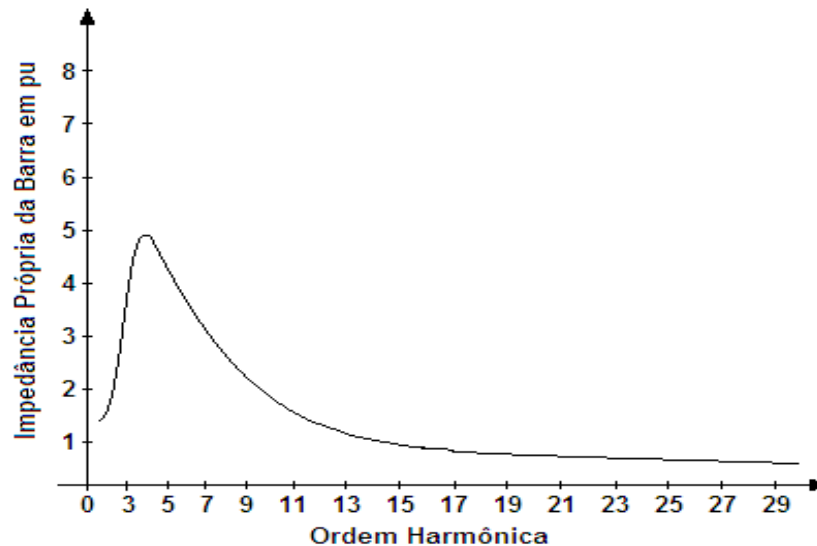


Figura A.2 – Impedância própria da barra em função da frequência.

Como se pode observar a presença de bancos de capacitores na barra de 13,2 kV provoca uma grande ressonância em torno do 4º harmônico. Esta ressonância também pode ser confirmada pela equação 3.31.

$$W_r = W\sqrt{(160/10)} = 4$$

A.2 Definição do número de filtros

Além do filtro anti-ressonante, sintonizado no 4º harmônico é necessário ainda à instalação de filtros adicionais para reduzir as distorções harmônicas. Pelo quadro anterior pode-se selecionar um filtro passa alta, amortecido sintonizado no 11º harmônico capaz de filtrar todos os harmônicos acima do 11º. O conjunto é completado com mais dois filtros simples, para o 5º e 7º harmônicos. Esquematicamente o conjunto de filtros selecionados apresenta a resposta em frequência similar à mostrada na Figura A.3.

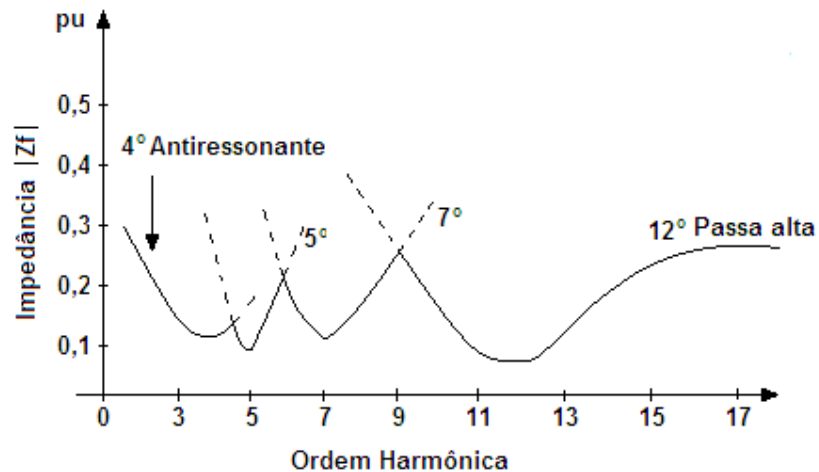


Figura A.3 – Resposta em frequência do conjunto de filtros.

A.3 Dimensionamento dos filtros

O dimensionamento dos filtros inicia-se com a distribuição dos capacitores (10MVAR para o exemplo considerado) entre os vários filtros.

Ao se efetuar esta divisão é necessário ter em conta que os reatores componentes dos filtros serão tanto menores quanto maiores forem os respectivos bancos de capacitores a eles sintonizados.

Além disso, como é visto a diante, as indutâncias dos reatores variam inversamente com o quadrado da ordem harmônica. Isto é harmônicos maiores exigem reatores menores. Como o custo dos reatores está diretamente ligado ao valor das indutâncias, seria interessante que estas fossem as menores possíveis, não se podendo evitar o fato de que os harmônicos de menor ordem exigem, necessariamente, filtros maiores e conseqüentemente elementos de maior potência.

- Dimensionamento dos filtros sintonizados

Considerando o coeficiente de temperatura do capacitor de 0,05% por °C; o coeficiente de temperatura do reator de 0,011% por °C; a temperatura ambiente 20 °C e a tolerância do sistema de 11% então da equação 5 vem:

$$\delta = (0,01)[1 + (0,5)(0,05.20 + 0,01.20)] = 0,016$$

Considerando que o ângulo de fase do sistema seja restringido para $\phi_{hr} < 75^\circ$ em qualquer frequência o valor ótimo de Q (com mais baixa tensão harmônica) pode então ser obtido da equação 23:

$$Q_0 = \frac{1 + \cos 75^\circ}{2.0,016.\text{sen}75^\circ} = 41$$

Para um tamanho de filtro total com 10 MVAR e, supondo que a capacitância está igualmente dividida entre todos os ramos do filtro, tem-se:

$$C_h = \frac{Q_{ch}}{V^2 \omega}$$

$$Q_{c4} = Q_{c5} = Q_{c7} = Q_{c12} = 2,5 \text{ MVAR}$$

Então:

$$C_4 = C_5 = C_7 = C_{12} = \frac{2,5.10^6}{(13,2.10^3)^2} = 38 \mu F$$

Sendo:

C_h : a capacitância do filtro para o harmônico h;

Q_{ch} : potência reativa fornecida pela capacitância C_h na frequência fundamental;

V: tensão fase-fase do sistema.

Da equação 11:

$$R_5 = \frac{1}{\omega_5 C Q} = \frac{1}{2\pi.300.38.10^{-6}.41} = 0,34 \Omega \text{ e } L_5 = \frac{R_5 Q}{\omega_5} = \frac{0,34.41}{2\pi.300} = 7,4 \text{ mH}$$

$$R_7 = \frac{1}{\omega_7 C Q} = \frac{1}{2\pi.420.38.10^{-6}.41} = 0,24 \Omega \text{ e } L_7 = \frac{R_7 Q}{\omega_7} = \frac{0,24.41}{2\pi.420} = 7,4 \text{ mH}$$

- Dimensionamento do filtro amortecido passa-alta

O dimensionamento de filtros amortecidos tem sido descrito por [31] com o auxílio de 2 parâmetros, a saber:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi CR} \text{ e } m = L/(R^2C)$$

Valores típicos de “m” estão entre 0,5 e 2. Para uma dada capacitância esses parâmetros (e, portanto, L e R) objetivam conseguir uma alta admitância na faixa de frequência requerida.

Os componentes do ramo amortecido são, portanto, obtidos escolhendo $m = 1$ e $f_0 = 660\text{Hz}$. Com $C_{11} = 38\mu\text{F}$ (fixado acima), tem-se:

$$R_{11} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_{11}} = \frac{1}{2\pi \cdot 660 \cdot 38 \cdot 10^{-6}} = 6,34\Omega$$

$$L_{11} = m \cdot R_{11}^2 \cdot C_{11} = 1(6,34)^2 \cdot 38 \cdot 10^{-6} = 1,53\text{mH}$$

Em outro método utilizado por Alves [33] os elementos dos filtros são definidos pelas seguintes equações:

$$L_h = \frac{1}{C_h w_h^2} \quad (36) \text{ e } R_h = Q_h \cdot L_h \cdot w_h \quad (37)$$

Para o exemplo considerado, os métodos dão resultados iguais, desde que admitamos $m = 1$ e

$Q_{12} = 1$ (fator de qualidade).

- Dimensionamento do filtro anti-ressonante

Para eliminação da ressonância de baixa ordem uma solução é um filtro sintonizado amortecido com baixo $Q \leq 10$.

Demonstra-se que a constante de tempo desse circuito é dada por $\sigma = 2RC$ e o fator de qualidade por $Q = \frac{w_r \sigma}{2}$ em que w_r é a frequência angular de ressonância.

Substituindo o valor de w_r da equação 31, tem-se:

$$Q = \frac{w\sigma}{2} \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q_c}}$$

(38)

Para a frequência de 60 Hz:

$$Q = \frac{60\pi\sigma}{2} \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q_c}}$$

Se quiser que o amortecimento se efetue em 1 ciclo tem-se:

$$Q = \pi \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q_c}} = \pi \sqrt{\frac{160}{10}} = 12,56$$

Ao se definir o fator de qualidade, dentro dos limites práticos descritos anteriormente, há a necessidade para se atentar ao fato, de que o tamanho dos reatores componentes dos filtros está intimamente ligado ao dimensionamento dos capacitores. Assim se o valor de Q_c for muito pequeno, tem-se em consequência um valor muito alto de L .

Consideram-se mantido o valor de $Q = 12,56$, que é ligeiramente superior ao valor prático de $Q \leq 10$, a redução de Q tem a vantagem do dimensionamento de um resistor um pouco menor, embora neste exemplo, o amortecimento se efetue em um tempo um pouco maior.

O filtro anti-ressonante é então definido: Sintonizado no 4º harmônico, $Q = 12,56$, $Q_c = 2,5 \text{MVAR}$ e $C = 38 \mu\text{F}$

Pelo método [1] com $m=1$ e $f_0 = 240 \text{Hz}$:

$$R_4 = \frac{1}{2\pi \cdot 240 \cdot 38 \cdot 10^{-6}} = 17,46 \Omega \text{ e } L_4 = 1 \cdot (17,46)^2 \cdot 38 \cdot 10^{-6} = 11,58 \text{mH}$$

Pelo segundo método de Alves (3) para se ter um filtro de $Q = 12,56$ deve-se ajustar o resistor para: $R_4 = 12,56 \cdot 0,01158 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 240 = 219,3 \Omega$

Um filtro sintonizado simples pode ser usado no lugar do filtro amortecido. Nesse caso é obtido um resistor muito menor com menores perdas, porém esse filtro não é muito susceptível a às variações no ponto de ressonância, causadas pelo aumento da potência de curto circuito do sistema, ou variações (pequenas) na configuração do sistema.

A.4 Projeto final do conjunto de filtros

A partir do projeto realizado e a especificação dos componentes dos filtros a Figura A.4 apresenta seu diagrama final. Este sistema foi modelado e simulado como mostra a Figura A.5.

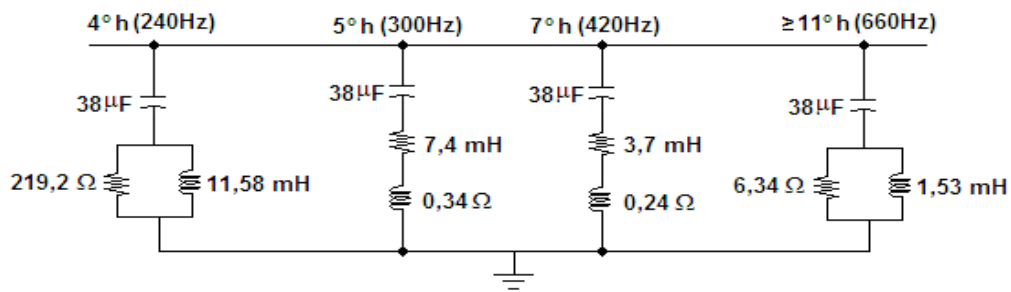


Figura A.4 – Estrutura do conjunto de filtros projetados

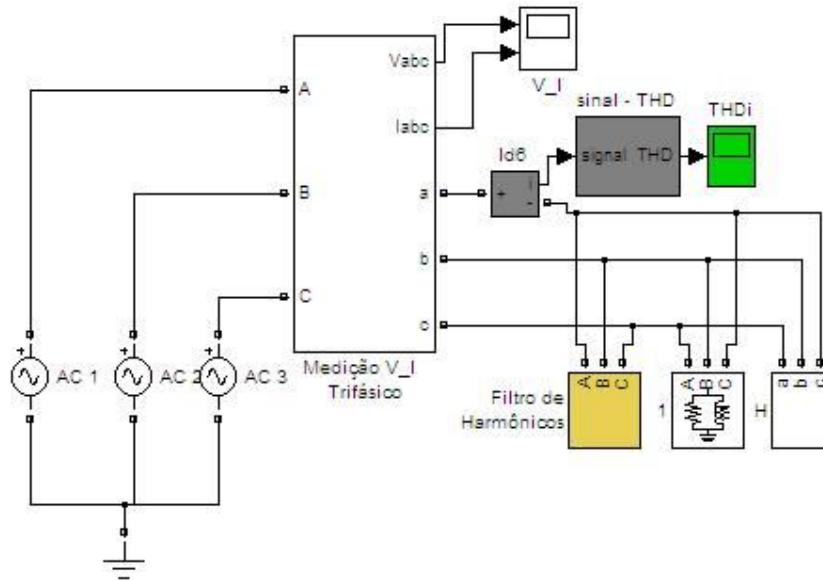


Figura 3.16 – Modelo do exemplo apresentado sobre projeto de filtros

O resultado obtido com a aplicação da estrutura do filtro projetado foi satisfatório pois reduziu a DHT de corrente de 4,7% para 3,1% uma redução de 34% na amplitude da DHT_i .

Para aumentar a eficiência do filtro a solução final exige uma otimização do dimensionamento, levando-se em consideração o custo dos elementos e as perdas (fator de qualidade).

Os valores de DHT obtidos estão dentro da norma o que dá segurança para utilizarmos esta configuração. As Figuras 24 e 25 mostram a DHT_i deste sistema antes e depois da utilização do filtro.

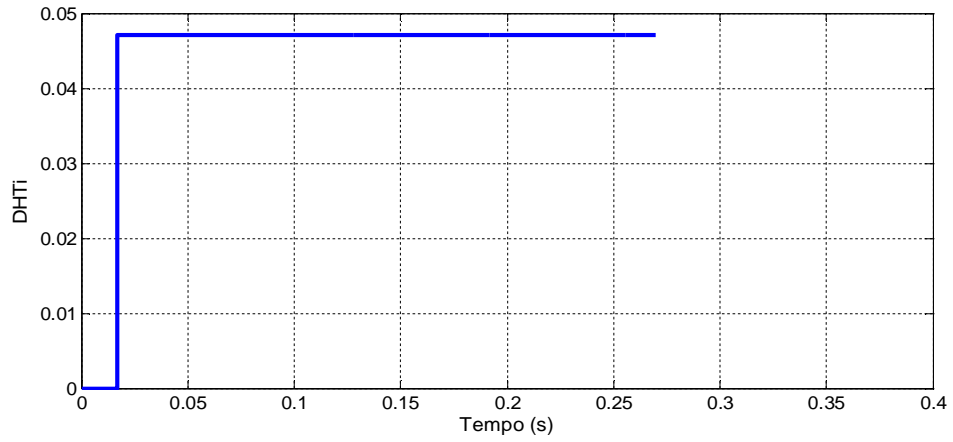


Figura 3.17 – DHT_i do modelo do exemplo apresentado sem filtro para harmônicos.

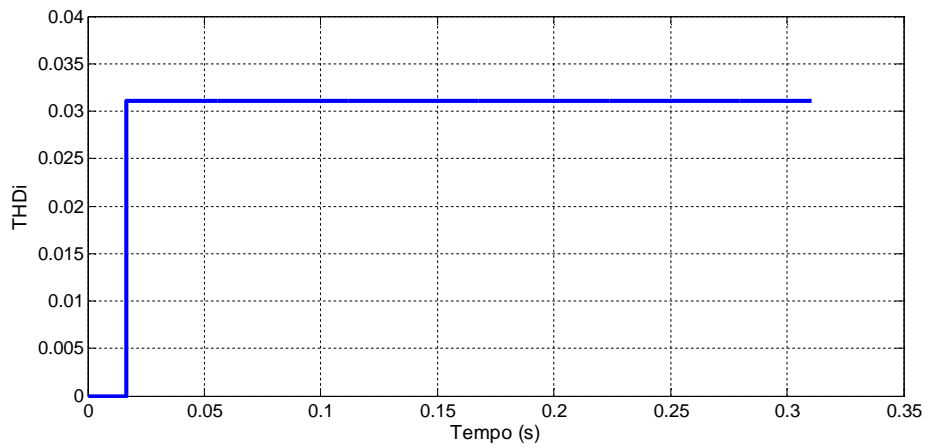


Figura 3.17 – DHT_i do modelo do exemplo apresentado com a inserção dos filtros para redução de harmônicos.

APÊNDICE B – DIAGRAMAS UNIFILARES DO SISTEMA ELÉTRICO

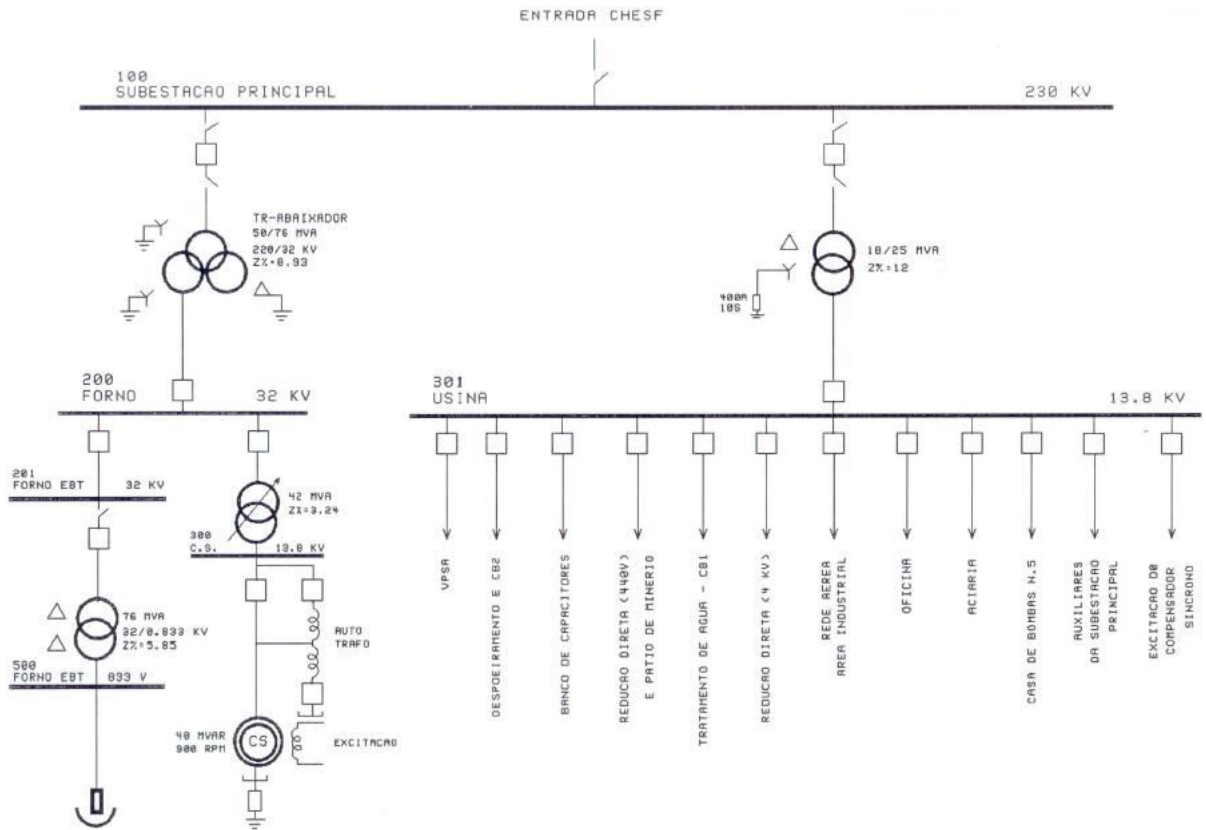


Figura B.1 – Diagrama Unifilar da Subestação Principal alimentando as cargas do Forno EBT e Usina

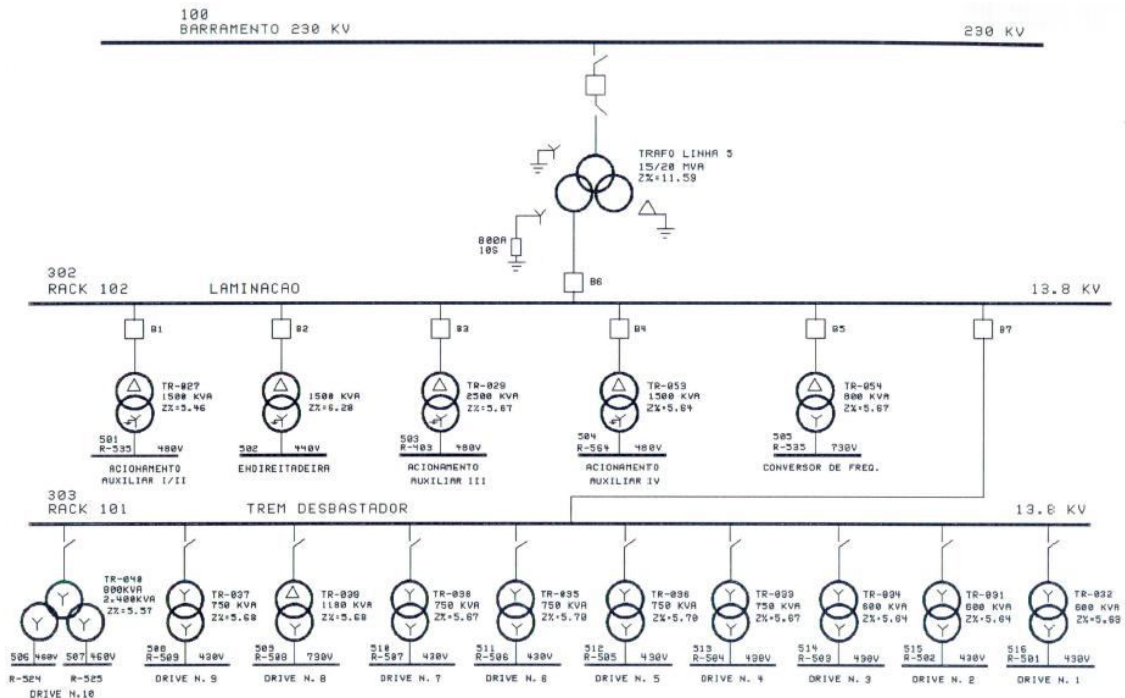


Figura B.2.a – Diagrama Unifilar da carga da Laminação: Desbaste

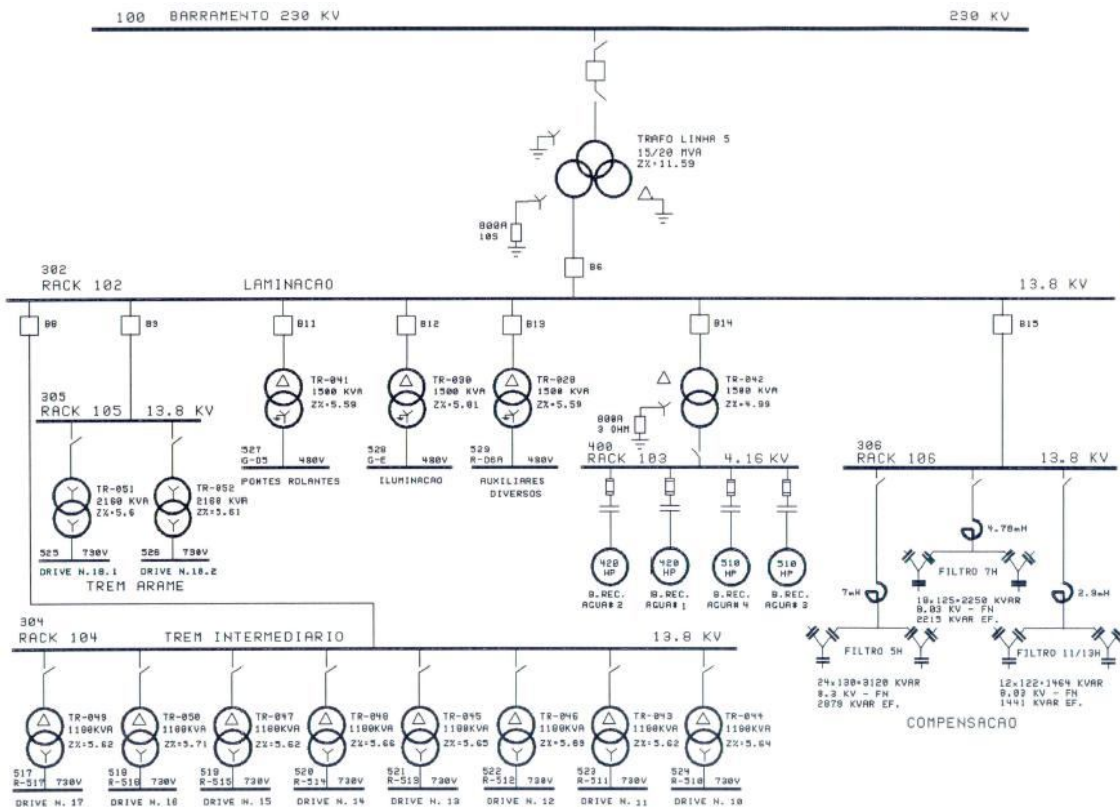


Figura B.2.b – Diagrama unifilar da Laminação: Intermediário, acabamento e compensação.

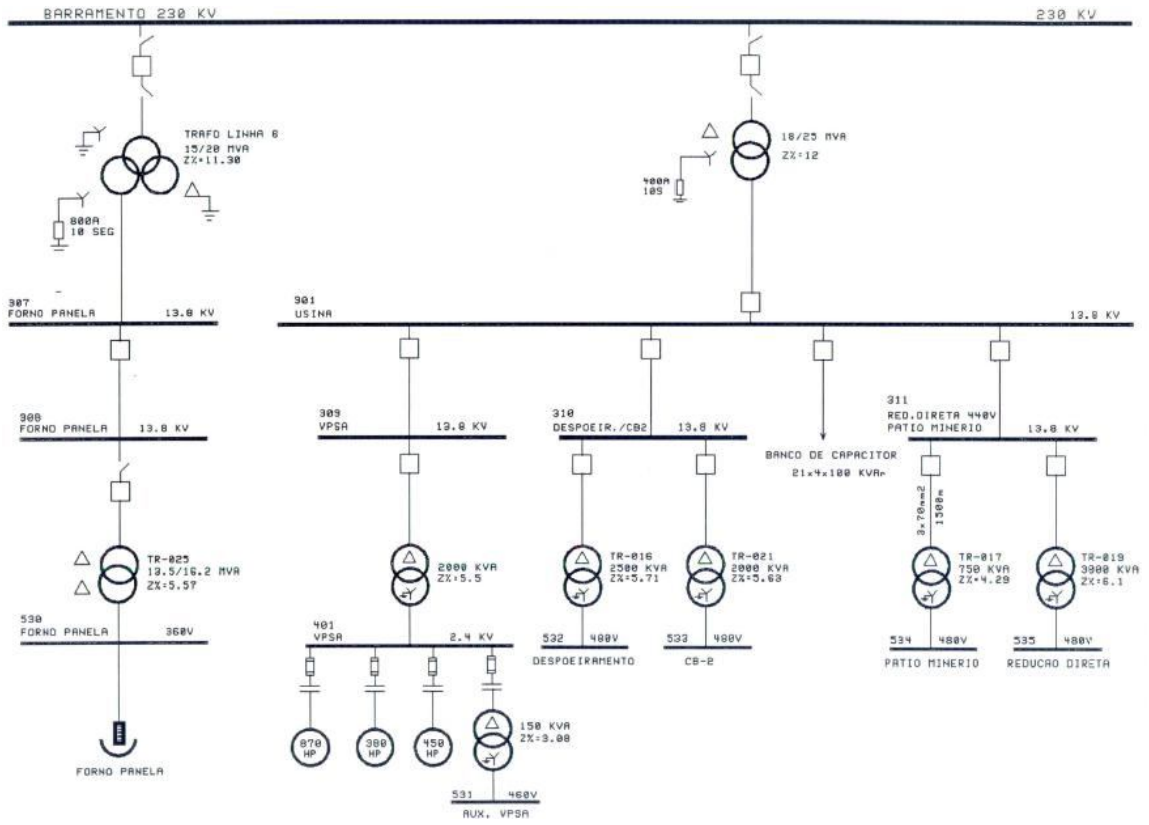


Figura B.3 – Diagrama unifilar do Forno Panela, Usina e Redução Direta

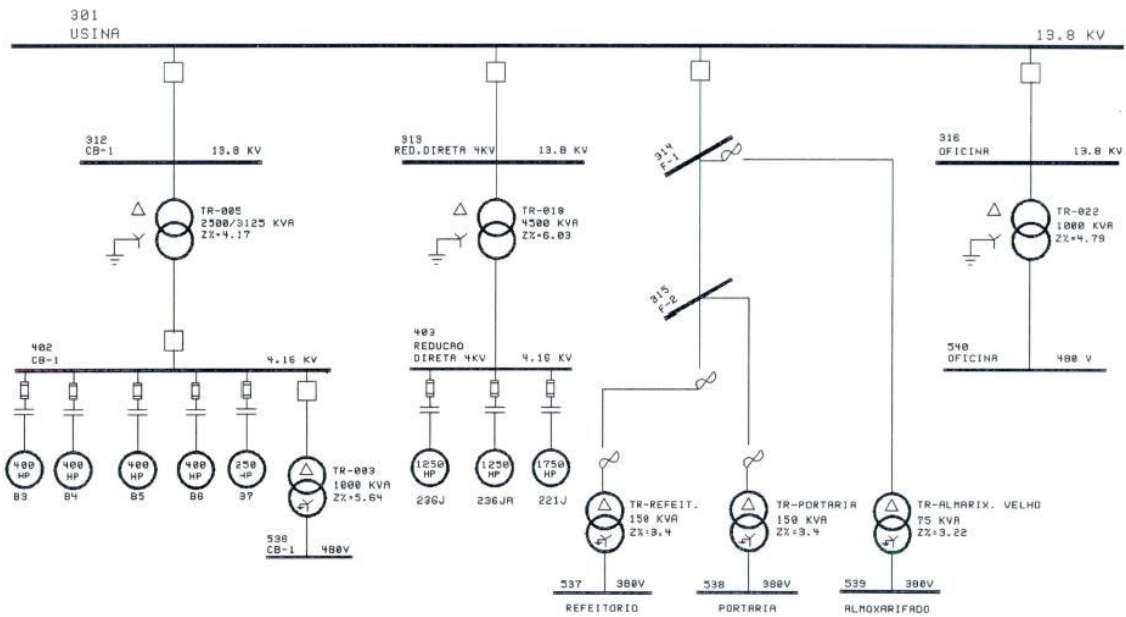


Figura B.4 – Continuação unifilar Usina.

APÊNDICE C – PROCESSO SIDERÚRGICO

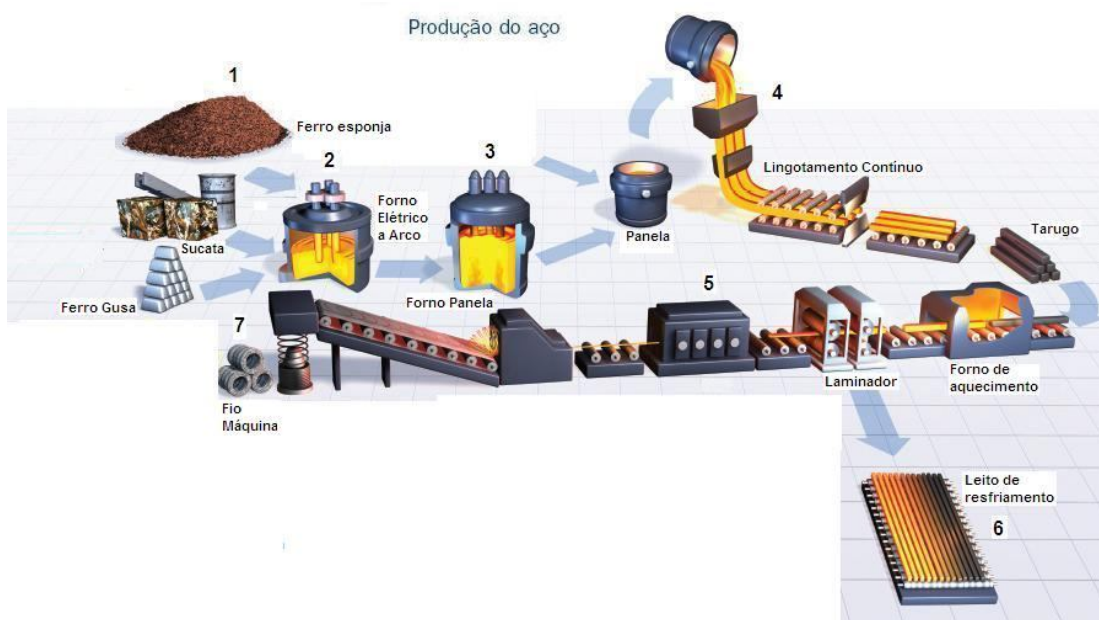


Figura C.1 – Processo Siderúrgico

A Figura C.1 mostra a estrutura do processo siderúrgico utilizando fornos a arco. Com o objetivo de familiarizar o leitor com a empresa estudada será explicado cada uma das etapas deste sistema. Estas estão numeradas de 1 a 5 como mostrado na figura C.1. Os números 6 e 7 representam dois produtos deste processo. A seguir será explicado cada uma destas etapas.

O ponto identificado como “1” representa as diversas cargas que são utilizadas como matéria prima para a produção do aço, tais como sucata, ferro-gusa e ferro esponja. O forno a arco elétrico, “2”, tem a função de fundir a matéria prima e manter a liga com temperatura apropriada para ser enviado ao forno panela “3”. O forno panela acrescenta ao aço as propriedades químicas exigidas pelo cliente através da adição de ligas. Após receber o tratamento pelo forno panela o aço é enviado ao lingotamento “4” onde o metal líquido é solidificado e transformado em tarugos. Os tarugos são encaminhados para a Laminação “5” onde é feita a conformação dos tarugos com as especificações desejadas pelo cliente. Os dois produtos gerados por este processo de Laminação são os vergalhões “6” colocados no leito de resfriamento e o fio máquina “7”. O fio máquina é utilizado como matéria-prima para a produção de pregos, arames e treliças.