

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA / ELETROTÉCNICA

GUILHERME GLODZIENSKI
LEANDRO MASCARI
MARLON SUBTIL PAZINATO

**FLUXO HARMÔNICO EM PLANTA COMERCIAL NA PRESENÇA DE GRUPO
GERADOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

GUILHERME GLODZIENSKI
LEANDRO MASCARI
MARLON SUBTIL PAZINATO

**FLUXO HARMÔNICO EM PLANTA COMERCIAL NA PRESENÇA DE GRUPO
GERADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha.

CURITIBA

2011

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo observar o efeito das correntes harmônicas dos tipos de cargas não lineares mais comumente encontradas numa instalação elétrica comercial que utiliza de grupo gerador operando no horário de ponta da concessionária. Estudos dos efeitos do comportamento harmônico nas cargas, transformadores e gerador serão apresentados, de forma que, possamos ter dados para abordar e comparar no desenvolvimento do trabalho. Condições de operação, parâmetros e fatores que influenciam nas distorções harmônicas e na influência destas no sistema, serão apresentados e levados em consideração para que se tenha um estudo o mais próximo possível ao real. Cálculos detalhados serão apresentados com a finalidade de dimensionamento de filtros passivos sintonizados que possam mitigar o efeito dessas distorções na rede. Com o desenvolvimento desses cálculos e com o auxílio de um software computacional, poderemos analisar as condições iniciais do sistema e fazer um levantamento através de gráficos do comportamento dos elementos do sistema com a presença das cargas não lineares. Posteriormente, com a adição dos filtros passivos, os mesmos gráficos destes mesmos elementos serão levantados para comparação e verificação das novas condições de operação do sistema.

Palavras chaves: harmônicos, grupo gerador, filtro passivo sintonizado.

ABSTRACT

This paper aims to observe the harmonics currents effects of the most generally non linear loads found in a commercial facility that uses generator set operating in a utility peak shaving. Studies of harmonic behavior effects on loads, transformers and generators set will be presented, so that we can have values to approach and for comparisons in this study development. Operations conditions, parameters e factors that influence in the harmonics distortions, and its influences on the system, will be shown and considered in order to reach a closest study to real. Detailed calculations will be shown in order to design passives tuned filters to be able to mitigate its distortions effects at the facility. With this calculations development and with the aid of computational software, we can analyze the initial system conditions and collect, by graphs, the behavior of the elements system in the presence of non linear loads. Afterwards, in addition of passive tuned filter, new graphs will be collected for comparison and verification of the new system operation conditions.

Key words: harmonics, generator set, tuned passive filter.

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

| | |
|------------|---|
| A | ampère |
| B | indução do campo magnético |
| C | capacitância |
| e | força eletromotriz |
| E_f | tensão interna do gerador |
| E_{fd} | tensão de excitação DC |
| E_{fg} | tensão de excitação do gerador síncrono |
| f | frequência |
| f_0 | frequência de ressonância |
| FP | fator de potência |
| Hz | hertz |
| I | corrente |
| I_h | corrente harmônica de ordem h |
| I_m | corrente máxima de demanda fundamental |
| I_n | corrente nominal do gerador |
| I_p | corrente de partida do motor |
| I_{pico} | corrente de pico |
| I_{rms} | corrente eficaz |
| I_T | corrente total |
| I_R | corrente em uma resistência |
| I_C | corrente em uma capacitância |
| I_L | corrente em uma indutância |
| $I_{\%}$ | percentual harmônica de corrente |
| L-C | circuito composto por uma capacitância e uma indutância |
| l | comprimento do condutor |
| L | indutância |
| L_{ff} | auto-indutância |

| | |
|-----------|---|
| N | número de espiras por fase |
| n | Ordem do harmônico |
| p | número de pólos |
| P | potência ativa |
| P_{hn} | potência aparente total |
| Q | fator de qualidade |
| Q_c | potência reativa |
| R | resistência |
| r_f | resistência do enrolamento DC |
| S | potência aparente |
| S_{hn} | potência aparente total |
| t | tempo |
| T_{dor} | constante de tempo transitória do eixo direto |
| v | velocidade linear de deslocamento do condutor |
| V | volt |
| V_1 | tensão na saída do gerador |
| VA | volt-ampére |
| var | var |
| V_T | queda de tensão total |
| V_R | queda de tensão em uma resistência |
| V_C | queda de tensão em uma capacitância |
| V_L | queda de tensão em uma indutância |
| $V_{\%}$ | porcentagem de tensão harmônica |
| X''_d | reatância subtransitória |
| X_L | reatância indutiva |
| X_C | reatância capacitiva |
| w | velocidade de rotação |
| y_h | corrente ou tensão harmônica de ordem h |
| Z | impedância |
| φ | ângulo entre tensão e corrente |
| Θ | ângulo formado entre Indução de campo magnético e velocidade linear |

δ fluxo de entreferro por pólo
 i_f corrente DC do enrolamento do rotor

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| AC | <i>Alternate Current</i> |
| ANEEL | Agencia Nacional de Energia Elétrica |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i> |
| ASD | <i>Adjustable Speed Drive</i> |
| AVR | <i>Automatic Voltage Regulator</i> |
| AVV | Acionamento de Velocidade Variável |
| CA | Corrente Alternada |
| CBEMA | <i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i> |
| CC | Corrente Contínua |
| CIC | Custo da Interrupção no Consumidor |
| DIT | Distorção Harmônica Individual |
| D-STATCOM | <i>Distribution Static Synchronous Compensator</i> |
| DC | <i>Direct Current</i> |
| DVR | <i>Dynamic Voltage Restorer</i> |
| FP | Fator de Potência |
| FPT | Fator de Potência Total |
| FC | Fator de Crista |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical And Electronic Engineers</i> |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| ITIC | <i>Information Technology Industry Council</i> |
| LFT | Lâmpadas Fluorescentes Tubulares |
| LFT | Lâmpadas Fluorescentes Compactas |
| Matlab | <i>Matrix Laboratory</i> |
| MOSFET | <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| p.u. | por unidade |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |

| | |
|---------|--|
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| SCR | <i>Silicon Controlled Rectifier</i> |
| SPWM | <i>Senoidal Pulse Width Modulation</i> |
| STATCOM | <i>Static Synchronous Compensator</i> |
| UPQC | <i>Unified Power Quality Conditioner</i> |
| UPS | <i>Uninterruptible Power Supply</i> |
| TDD | Taxa de Distorção de Demanda Total |
| THD | Taxa de Distorção Harmônica |
| VSC | <i>Voltage Source Converter</i> |
| VSI | <i>Voltage Source Inverter</i> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 – forma de onda distorcida..... | 22 |
| Figura 2-2 – espectro harmônico de amplitude da tensão. | 24 |
| Figura 2-3 – forma de onda de uma carga puramente resistiva. | 27 |
| Figura 2-4 – forma de uma carga mista (resistiva e indutiva)..... | 28 |
| Figura 2-5 – conversor de frequência..... | 31 |
| Figura 2-6 – formas de onda de corrente e tensão de entrada de uma ponte retificadora trifásica a diodos. | 31 |
| Figura 2-7 – forma de onda da corrente de fase de um RCT. | 33 |
| Figura 2-8 – filtro shunt de primeira ordem. | 37 |
| Figura 2-9 – diagrama fasorial da ressonância série..... | 40 |
| Figura 2-10 – diagrama fasorial da ressonância paralela..... | 41 |
| Figura 3-1 – diagrama unifilar simplificado. | 57 |
| Figura 3-2 – espectro harmônico da lâmpada. | 63 |
| Figura 3-3 – espectro harmônico de inversor de frequência. | 64 |
| Figura 3-4 – espectro harmônico do computador. | 64 |
| Figura 3-5 – diagrama com alimentação da concessionária. | 67 |
| Figura 3-6 – diagrama com alimentação dos geradores. | 68 |
| Figura 3-7 – diagrama para sequência zero..... | 68 |
| Figura 3-8 – forma de onda de tensão na barra com alimentação da concessionária. | 69 |
| Figura 3-9 – forma de onda de tensão na carga com alimentação da concessionária. | 70 |
| Figura 3-10 – forma de onda de tensão no grupo gerador. | 70 |
| Figura 3-11 – forma de onda de tensão na barra com alimentação do grupo gerador. | 71 |
| Figura 3-12 – forma de onda de tensão na carga com alimentação do grupo gerador. | 71 |
| Figura 3-13 – forma de onda de corrente na carga com alimentação da concessionária..... | 72 |
| Figura 3-14 – forma de onda de corrente na concessionária. | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-15 – forma de onda de corrente no grupo gerador..... | 73 |
| Figura 3-16 – forma de onda de corrente na carga com alimentação do grupo gerador. | 73 |
| Figura 3-17 – forma de onda de tensão no grupo gerador – com filtro 1. | 80 |
| Figura 3-18 – forma de onda de tensão na barra com alimentação do grupo gerador – com filtro 1. | 80 |
| Figura 3-19 – forma de onda de tensão na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 1. | 81 |
| Figura 3-20 – forma de onda de corrente no grupo gerador – com filtro 1. | 81 |
| Figura 3-21 – forma de onda de corrente na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 1..... | 82 |
| Figura 3-22 – resposta em frequência para filtro de quinto harmônico, 282 Hz e Q_c 5..... | 84 |
| Figura 3-23 – resposta em frequência para filtro de quinto harmônico, 290 Hz e Q_c 30..... | 85 |
| Figura 3-24 – forma de onda de tensão no grupo gerador – com filtro 2. | 86 |
| Figura 3-25 – forma de onda de tensão na barra com alimentação do grupo gerador – com filtro 2. | 87 |
| Figura 3-26 – forma de onda de tensão na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 2. | 87 |
| Figura 3-27 – forma de onda de corrente no grupo gerador – com filtro 2. | 88 |
| Figura 3-28 – forma de onda de corrente na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 2..... | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2-1 – principais classes de circuitos e dispositivos responsáveis pela geração de distorções harmônicas. | 29 |
| Tabela 3-1 – potências e demandas dos transformadores. | 58 |
| Tabela 3-2 – valores de placa dos equipamentos. | 58 |
| Tabela 3-3 – divisão de potência por equipamento. | 65 |
| Tabela 3-4 – valor da corrente dos harmônicos em cada carga. | 66 |
| Tabela 3-5 – análise de distorção harmônica de tensão e corrente. | 74 |
| Tabela 3-6 – limites de distorção segundo a ANEEL. | 74 |
| Tabela 3-7 – valor das potências reativas calculadas. | 76 |
| Tabela 3-8 – valores de impedância do capacitor e capacitância para cada carga, na frequência fundamental, do sistema e seu respectivo valor comercial. | 78 |
| Tabela 3-9 – valores de indutância para quinta e sétima harmônica. | 79 |
| Tabela 3-10 – valores de resistência para quinta e sétima harmônica. | 79 |
| Tabela 3-11 – análise do THD de tensão com filtro. | 82 |
| Tabela 3-12 – valores de tensão e corrente do filtro. | 83 |
| Tabela 3-13 – valores de parâmetros dos filtros recalculados. | 86 |
| Tabela 3-14 – análise das distorções harmônicas com filtros recalculados. | 89 |
| Tabela 3-15 – valores de tensão e corrente dos filtros recalculados. | 90 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | TEMA | 16 |
| 1.1.1 | DELIMITAÇÃO DO TEMA | 17 |
| 1.2 | PROBLEMAS E PREMISSAS..... | 17 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.3.1 | Objetivo geral..... | 18 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos..... | 18 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 18 |
| 1.5 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 19 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 20 |
| 2 | REVISÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | HARMÔNICOS..... | 21 |
| 2.1.1 | Definições de Harmônicos | 21 |
| 2.1.2 | Causas dos harmônicos | 22 |
| 2.1.3 | Índices de harmônicos..... | 22 |
| 2.1.3.1 | Taxa de distorção harmônica..... | 22 |
| 2.1.3.2 | Espectro | 23 |
| 2.1.3.3 | Fator de crista..... | 24 |
| 2.1.3.4 | Fator de potência..... | 25 |
| 2.1.4 | Efeitos dos Harmônicos..... | 26 |
| 2.1.4.1 | Diminuição do fator de potência | 26 |
| 2.1.4.2 | Perdas nos Condutores | 26 |
| 2.2 | FONTES GERADORAS DE HARMÔNICAS..... | 27 |
| 2.2.1 | Cargas lineares..... | 27 |
| 2.2.2 | Cargas não lineares..... | 28 |
| 2.2.3 | Exemplo de fontes geradoras de harmônicos | 30 |
| 2.2.3.1 | Conversores de frequência..... | 30 |
| 2.2.3.2 | Reator controlado a tiristores..... | 32 |
| 2.2.3.3 | Lâmpadas fluorescentes..... | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.3.4 | Eletrônicos | 35 |
| 2.3 | FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICOS | 36 |
| 2.3.1 | Filtros shunt | 37 |
| 2.3.2 | Fator de dessintonia | 37 |
| 2.3.3 | Fator de qualidade | 38 |
| 2.3.4 | Ressonância | 38 |
| 2.3.4.1 | Frequência de ressonância..... | 39 |
| 2.3.4.2 | Ressonância série | 39 |
| 2.3.4.3 | Ressonância paralela | 40 |
| 2.4 | SISTEMA DE TARIFAÇÃO | 42 |
| 2.4.1 | Introdução..... | 42 |
| 2.4.2 | Classificação dos consumidores..... | 43 |
| 2.4.3 | As vantagens do uso de grupo gerador no horário de ponta .. | 44 |
| 2.5 | GERADORES SÍNCRONOS..... | 46 |
| 2.5.1 | Causas dos harmônicos em grupos gerador | 46 |
| 2.5.1.1 | Aquecimento..... | 47 |
| 2.5.1.2 | Efeitos no regulador de tensão | 48 |
| 2.5.1.3 | Prevenções de harmônicos nas construções de GMG..... | 50 |
| 2.5.2 | Harmônicos e capacitores | 50 |
| 2.5.3 | Proteções..... | 52 |
| 3 | OBJETO DE ESTUDO | 55 |
| 3.1 | ESTUDO | 55 |
| 3.1.1 | Fonte de estudo..... | 55 |
| 3.1.2 | Planta | 56 |
| 3.1.3 | Cálculos Preliminares | 59 |
| 3.2 | DADOS HARMÔNICOS..... | 62 |
| 3.2.1 | Lâmpadas | 62 |
| 3.2.2 | Ar-condicionado..... | 63 |
| 3.2.3 | Computadores | 64 |
| 3.2.4 | Correntes harmônicas | 65 |
| 3.2.5 | Correntes de sequência zero..... | 66 |
| 3.3 | SIMULAÇÃO | 67 |
| 3.3.1 | Resultados..... | 69 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.2 | Dimensionamento do filtro passivo sintonizado | 75 |
| 3.3.2.1 | Correção do fator de potência | 75 |
| 3.3.2.2 | Cálculo do capacitor | 77 |
| 3.3.2.3 | Cálculo do indutor..... | 78 |
| 3.3.2.4 | Cálculo do resistor | 79 |
| 3.3.3 | Resultados com filtros passivos sintonizados..... | 80 |
| 3.3.3.1 | Resultados com utilização de frequência de sintonia recomendadas pela ANEEL. | 80 |
| 3.3.3.2 | Dimensionamento de filtros com novo fator de sintonia e fator de qualidade 84 | |
| 3.3.3.3 | Resultados da inserção dos filtros recalculados..... | 86 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 91 |
| 4.1.1 | Fluxo harmônico na planta | 91 |
| 4.1.2 | Análise dos filtros passivos sintonizados..... | 92 |
| 4.1.3 | Análise dos grupos geradores | 92 |
| 5 | REFERÊNCIAS..... | 94 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Diversas redes comerciais utilizam de grupos geradores (GMG) regime prime, para alimentação de suas cargas instaladas no chamado horário de pico. Porém, alguns desses grupos geradores operam sob sérias restrições devido à presença de harmônicos, ou seja, onda de corrente ou tensão deformada (GERIN, 2003), que circulam na rede elétrica. Essa situação faz com que a empresa utilize a energia da concessionária, e pague uma tarifa elevada no período em que deveria entrar em operação o grupo motor-gerador.

Os consumidores, que na tarifa de distribuição pertencem ao grupo A, indústrias e comércio (COPEL, 2008), optam por gerar sua própria energia consumida geralmente através de grupos geradores devido ao elevado valor da tarifa imposta no horário compreendido entre as 18 e 21 horas. Esse horário tem uma tarifação diferenciada de energia, que pertence à chamada tarifa de ponta (ANEEL, 2005). Conhecido como horário de pico, tal horário possui a maior demanda do dia no consumo de energia elétrica. Toda essa demanda exige das fontes, gastos maiores com infra-estrutura e manutenção, o que faz com que exista uma tarifação diferenciada nesse horário. Com a utilização de geração própria, a indústria ou comércio têm maiores gastos iniciais com implantação de todo o sistema necessário. Porém, em longo prazo, se torna viável financeiramente, pois o consumidor economizará no valor pago à concessionária que fornece energia no horário de ponta. Além disso, em caso de interrupção de energia, o processo de produção pode continuar.

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Existem casos em que o grupo motor-gerador assume a carga com certas dificuldades, por consequência da alta intensidade harmônica existente na instalação.

Um grande contribuinte de distorção harmônica são cargas não lineares, que funcionam com o princípio de fontes chaveadas (WILLIAMS, 2010), como reatores de lâmpadas fluorescentes, inversores e conversores de frequência para motores assíncronos ou motores em corrente contínua, computadores, *no breaks*, máquinas de solda, entre outros equipamentos muito comuns em indústrias.

A somatória de todas essas fontes de harmônicos gera distúrbios na rede e seu maior efeito em máquinas rotativas (indução e síncrona), é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre (POMÍLIO, 2010); assim a proteção do gerador atua.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Algumas redes comerciais, como *Shoppings Centers*, possuem grupos geradores para fornecer energia, ao invés da concessionária, em horário de ponta ou em situação de interrupção de energia. Quando há elevados distúrbios na rede devido às cargas não lineares, o sistema de controle do grupo gerador pode interpretar como condição anormal (KUMAR, 2004), impedindo a perfeita operação do GMG.

O gerador síncrono do GMG possui uma impedância bem maior do que o transformador de interligação com a concessionária, o que faz com que as mesmas cargas não lineares provoquem uma maior distorção na tensão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento harmônico em uma planta comercial com utilização de um grupo gerador, tendo como base uma planta de *Shopping Center*. Também mostrar, através de simulações, o efeito da mudança de parâmetros da planta nas distorções harmônicas.

1.3.2 Objetivos específicos

Coletar bibliografias referentes a estudo harmônico e grupos geradores.

Levantar os parâmetros, tais como impedância dos transformadores, impedância da concessionária, impedância do gerador, regime *prime*.

Simular uma planta comercial via *Software MATLAB*, de acordo com as informações coletadas.

Analisar a influência harmônica na planta.

Dimensionar um filtro de harmônico, a fim de atenuar as distorções harmônicas de tensão na planta.

Formular resoluções para que o grupo gerador opere sem restrições, que podem existir com a presença de harmônicos, no horário da comutação entre alimentação da concessionária e carga, na presença de cargas não lineares geradoras de harmônicos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com a evolução tecnológica, tornou-se mais frequente a presença de cargas não lineares nas instalações elétricas, por possuírem grande eficiência. Entretanto,

esses equipamentos geram distúrbios harmônicos na rede causando sérios problemas em grupos geradores (DIAS, 2002). Logo, os consumidores não conseguem reduzir suas tarifas de energia elétrica no horário de ponta, optando pela escolha da concessionária como fornecimento de energia no lugar de GMG.

O entendimento das propriedades e consequências dos harmônicos tornam possível realizar projetos para adequação de equipamentos aos efeitos desses distúrbios na rede. Assim, o uso dos GMG, substituindo a energia da concessionária durante o intervalo de tempo do horário de pico, garantiria uma economia nas indústrias com esses problemas.

Uma das maiores preocupações dos consumidores em realizar estudos e fazer testes com as possíveis soluções é o preço. Os equipamentos e instalações envolvidos possuem alto valor agregado, e o estudo pode comprometer o funcionamento temporário da rede, tornando a análise inviável. Assim, com o software, é possível simular toda a rede e seus parâmetros, tornando-se viável a realização das propostas de solução.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Toda a estrutura de pesquisa do trabalho será feita com base em referências bibliográficas, com o intuito de desenvolver um estudo em cima grupos motor-gerador, distorções harmônicas, suas causas e efeitos, tarifação horosazonal, utilizando para tais pesquisas: livros, revistas, artigos, catálogos de fabricantes de equipamentos, internet, normas nacionais e internacionais, entre outras fontes de pesquisa.

Em paralelo com a fase de pesquisa do projeto, será feito um estudo teórico com dados reais de sistema, para analisar a influência da distorção harmônica numa planta comercial. Far-se-á um levantamento de dados e estudos de toda a rede, para em seguida simular, via software, toda a instalação e assim desenvolver um método de correção para a influência harmônica.

Através deste estudo, e com base na fundamentação teórica, será possível estabelecer as causas do mau funcionamento do grupo gerador, o comportamento do filtro, e fazer as conclusões finais do trabalho através dos dados levantados.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho será formado por cinco capítulos. O parágrafo primeiro será uma introdução geral sobre a abordagem da proposta, expondo o problema, os objetivos da resolução e a justificativa. Também explica o método de pesquisa elaborado para o desenvolvimento desse projeto.

O segundo capítulo será abordado os referenciais teóricos sobre harmônicos, cargas não lineares, grupos motor-gerador, tarifação, conceitos de filtros para atenuação de harmônicos.

O terceiro será destinado ao desenvolvimento do projeto, relatando as influências harmônicas na instalação, com concessionária e com grupo gerador, e a utilização de filtros para atenuação de harmônicos. Em seguida serão expostas as medições e parâmetros da instalação em estudo, e então uma simulação via software da rede industrial, e os dimensionamentos realizados para a resolução do problema, além dos resultados obtidos através das simulações.

E no parágrafo quarto, baseado na experiência adquirida ao longo da pesquisa realizada e do desenvolvimento do projeto, serão evidenciadas as considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 HARMÔNICOS

2.1.1 Definições de Harmônicos

Formas de onda de tensão e de corrente que são de característica senoidal, podem possuir algumas distorções na instalação. Essas distorções são de frequências duas ou mais vezes a frequência fundamental do sistema (60 Hz), considerando o sistema brasileiro.

Harmônicos são definidos como sendo essas perturbações: sinal com a frequência múltipla inteira da frequência fundamental do sinal. Elas são definidas conforme suas frequências, divididas em ordens. A ordem do sinal harmônico significa quantas vezes ela é múltipla da fundamental, por exemplo: o terceiro harmônico significa frequência três vezes a fundamental sendo igual a 180 Hz, a quarta 240 Hz, a quinta 300 Hz, e assim por diante.

Segundo a transformada de Fourier, toda função periódica e não senoidal pode ser representada pela soma de expressões série, que é composta por uma expressão senoidal em frequência fundamental, e por expressões senoidais cuja frequência de cada senoide, é múltipla da senoide fundamental (harmônico) e de uma eventual componente contínua (MARTINHO, 2009).

Na figura 2-1 existem três formas de onda. A onda “1” representa a de frequência fundamental, a onda “5” o quinto harmônico, e a onda “T”, que é a onda distorcida, representa a soma de ambas.

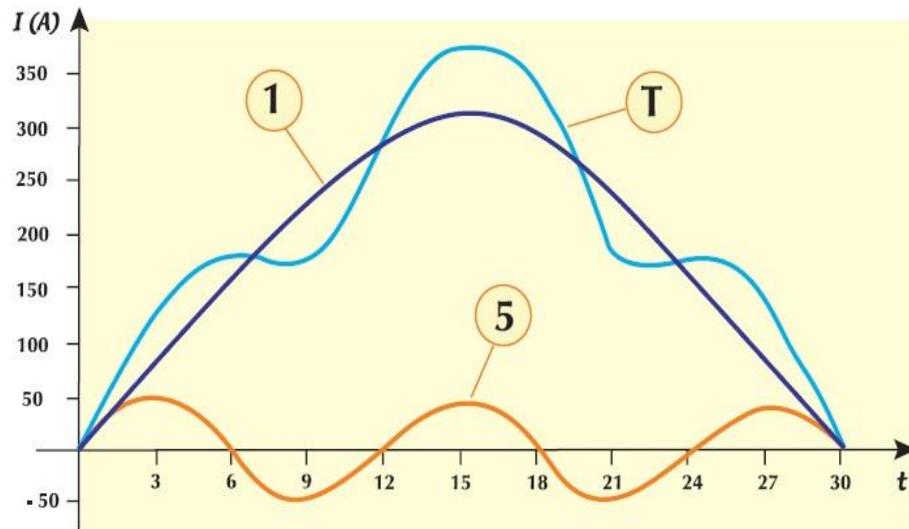


Figura 2-1 – forma de onda distorcida.

Fonte: PROCOBRE, 2001.

2.1.2 Causas dos harmônicos

As deformações nas ondas de corrente são consequências do funcionamento de cargas não lineares conectadas na rede CA.

Com o avanço da eletrônica, cargas não lineares têm aparecido cada vez mais do ambiente industrial, como controladores de velocidade, reatores eletrônicos, computadores, etc.

2.1.3 Índices de harmônicos

2.1.3.1 Taxa de distorção harmônica

Considerando um sinal y , a taxa de distorção harmônica é definida pela fórmula abaixo.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N y_h^2}}{y_1} \quad (1)$$

Expressa em porcentagem, essa equação indica a deformação da onda de corrente ou tensão da instalação. N é o máximo harmônico considerado, geralmente relevante até o harmônico de ordem 50.

Essa indicação para ondas de corrente e dependendo da natureza da carga, pode ser enganosa quando a corrente fundamental de carga é baixa (ARRILAGA, WATSON, 2003). Assim utiliza-se a taxa de distorção da demanda total (TDD) que mede a distorção em relação à corrente mais significativa na rede, tal como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_m} \quad (2)$$

Com a finalidade de conhecer a contribuição de cada harmônico, existe a distorção harmônica individual (DIT), segundo a expressão:

$$DIT = \frac{y_h}{y_1} \quad (3)$$

2.1.3.2 Espectro

Espectro harmônico é a disposição de amplitude das frequências em ordem crescente. Para uma melhor análise individual, o espectro dos harmônicos pode ser analisado através de um histograma que mostra separadamente a contribuição de cada ordem de harmônico.

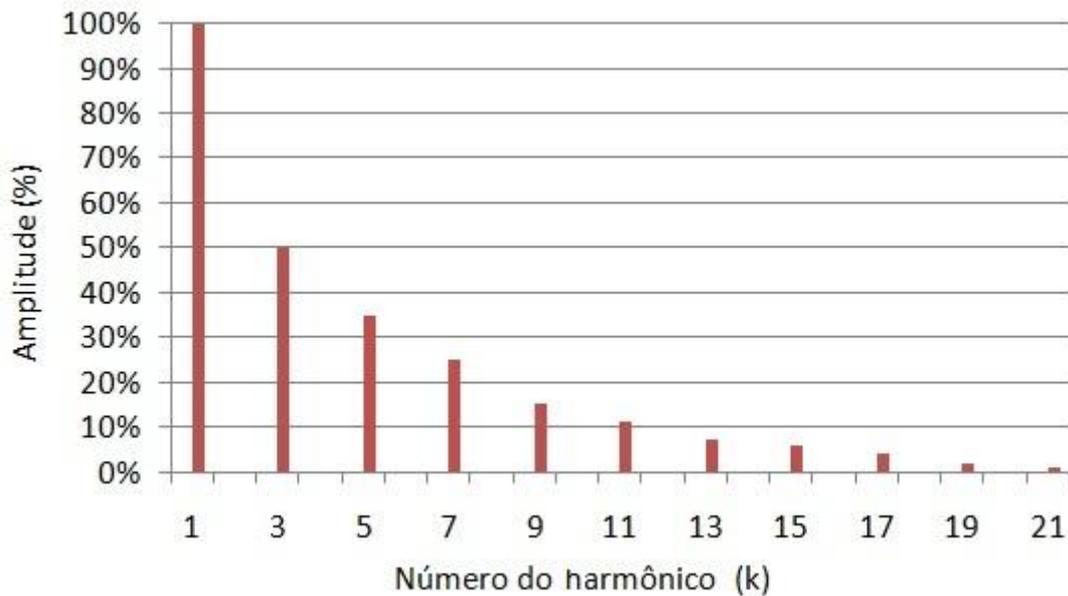


Figura 2-2 – espectro harmônico de amplitude da tensão.

Fonte: própria.

2.1.3.3 Fator de crista

Fator de crista (FC) é a proporção entre o valor de pico de uma onda e o seu valor eficaz, considerando onda de corrente.

$$FC = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (4)$$

Essa relação é igual a $\sqrt{2}$ quando um sinal não possui distorção, ou seja, perfeitamente senoidal.

2.1.3.4 Fator de potência

A relação entre a potência ativa e a potência aparente é definida por fator de potência FP, ou cosseno φ .

$$FP = \cos\varphi = \frac{P (W)}{S (VA)} \quad (5)$$

O fator de potência total (FPT) é a proporção entre a potência ativa e aparente total, segundo a norma IEEE Std. 519-1992, porém é utilizada quando se trata de significantes distorções harmônicas.

$$FPT = \frac{P_{hn}(W)}{S_{hn}(VA)} \quad (6)$$

Também se expressa em função da taxa de distorção harmônica (THD).

$$FPT = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (7)$$

2.1.4 Efeitos dos Harmônicos

2.1.4.1 Diminuição do fator de potência

As cargas indutivas, que é o caso mais comum da rede elétrica, possuem uma reatância X_L para a frequência fundamental de 60 Hz. Já na presença do harmônico de ordem três, a reatância é 3 vezes maior que X_L . Na presença do quinto harmônico é cinco vezes X_L e assim sucessivamente. Isso devido à indutância ser diretamente proporcional à frequência. Já numa carga resistiva, a resistência não é proporcional à frequência.

Dessa forma há uma diminuição do fator de potência na presença de distúrbios, pois há uma maior queda de tensão nos componentes indutivos.

2.1.4.2 Perdas nos Condutores

Existe uma não uniformidade da indutância na seção reta nos condutores, ou seja, no centro de um condutor há um número maior de linhas de fluxo comparado à sua superfície. Logo, para uma frequência de 60 Hz, a reatância em seu interior é mais elevada do que na periferia (GERIN, 2003).

Esse efeito é conhecido como “efeito pelicular”, e quanto maior for a frequência do harmônico circulante, mais elevada será a resistência CA no interior do condutor. Isso ocorre pelo fato da área efetiva, utilizada pelos elétrons livres, ser menor para a circulação de corrente, e assim maior serão as perdas térmicas por efeito Joule

2.2 FONTES GERADORAS DE HARMÔNICAS

2.2.1 Cargas lineares

Cargas lineares são aquelas constituídas por resistências, indutâncias e capacitância, cujas formas de onda de tensão e corrente são sempre senoidais. Uma carga linear é aquela em que há uma relação linear entre corrente e tensão. Quando a carga for dita mista (associação entre resistores, capacitores e indutores), a corrente pode estar defasada por um ângulo ϕ em relação à tensão.

Como exemplo, para uma carga puramente resistiva, tomamos um chuveiro elétrico de potência 4800 W, sendo a forma de onda de tensão e corrente representadas na figura 2-3.

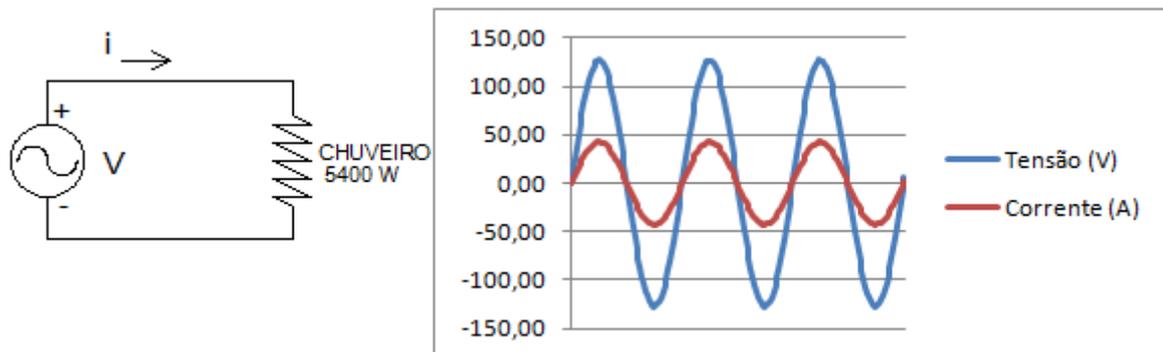


Figura 2-3 – forma de onda de uma carga puramente resistiva.

Fonte: própria.

E, na figura 2-4, temos a forma de onda de tensão e corrente de uma carga mista (resistência e indutância associadas em série), e está sendo utilizado um motor de 1/6 cv, rendimento de 80% e fator de potência 0,85, cuja corrente está defasada de um ângulo ϕ em relação à tensão.

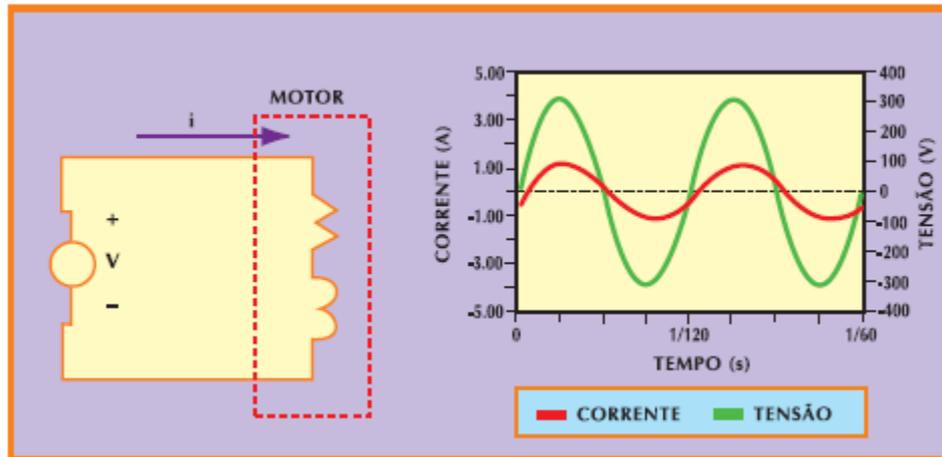


Figura 2-4 – forma de uma carga mista (resistiva e indutiva).

Fonte: PROCOBRE, 2001.

Contudo, cargas ditas lineares não são fontes geradoras de harmônicas, mesmo quando a onda de corrente estiver defasada em relação à de tensão.

2.2.2 Cargas não lineares

Recentemente, havia um número pequeno de cargas não lineares causadoras das distorções nas formas de onda de corrente e tensão, conectadas ao sistema elétrico. Quando a eletrônica de potência entrou em ascensão, disponibilizou para comércios e industriais uma série de equipamentos eletrônicos, os quais usam retificadores (monofásicos ou trifásicos), capazes de gerar harmônicos.

Os retificadores monofásicos são os mais encontrados em aparelhos de baixa potência, porém os conversores trifásicos, devido a sua grande potência, são os maiores responsáveis pela distorção harmônica (ARRILLAGA, WATSON, 2003).

A tabela 2-1 ilustra alguns circuitos e dispositivos responsáveis pela geração de distorções harmônicas.

Tabela 2-1 – principais classes de circuitos e dispositivos responsáveis pela geração de distorções harmônicas.

| Fontes de distorções harmônicas | | |
|---|------------------------|-----------------------|
| Conversores a diodos | Fornos elétricos | Transformadores |
| Conversores a tiristores | Conversores CC-CC | Fontes chaveadas |
| Controladores de velocidades ajustáveis | Inversores | Controladores de fase |
| Inversores | Lâmpadas fluorescentes | Lâmpadas mistas |
| | Reatores eletrônicos | |

Fonte: própria.

Uma porção significativa da energia elétrica passa por dispositivos de eletrônica de potência, em que são empregados diodos, transistores e tiristores, que operam na maioria dos casos, em modo de interrupção.

Isso implica um funcionamento em dois estados: estado de condução e estado de bloqueio.

O estado de condução é quando a corrente que passa pelo dispositivo pode alcançar valores elevados, mas a tensão é praticamente nula e, portanto, a dissipação de potência no dispositivo é muito pequena. Dessa forma o dispositivo possui um funcionamento semelhante a um interruptor fechado.

Já o estado de bloqueio é quando a corrente que passa pelo dispositivo é muito pequena e a tensão é elevada. Logo, a dissipação de potência no dispositivo também é muito pequena. Assim, o dispositivo apresenta um funcionamento análogo a um interruptor aberto.

Esses dispositivos usados na eletrônica de potência, chamados de semicondutores, passam rapidamente de um estado para outro através de circuitos que consomem menos de 5 W.

Os semicondutores fazem o controle da tensão e corrente gerando correntes não senoidais e, portanto, correntes harmônicas. Isso ocorre mesmo quando são alimentados por uma tensão puramente senoidal, causando distorções na forma de onda de tensão e corrente da fonte de alimentação.

As cargas não lineares drenam, da fonte, as correntes não senoidais, as quais podem distorcer a tensão devido à interação com a impedância equivalente à montante da barra da carga (BRITO, LEÃO, 2006)

2.2.3 Exemplo de fontes geradoras de harmônicos

Neste tópico serão apresentadas algumas cargas (equipamentos) e fenômenos “poluidores”, encontrados nas instalações elétricas, e que são importantes fontes geradoras de correntes harmônicas.

2.2.3.1 Conversores de frequência

Os conversores eletrônicos de potência, tais como retificadores e controladores CA são grandes geradores de harmônicas.

Conversores de frequência são divididos em três partes: retificadores, barramento CC, e inversores. Na figura 2-5 mostramos as partes de um conversor de frequência VSI. O retificador a diodos é em ponte completa; o barramento CC é composto pelo capacitor, e o inversor utiliza IGBT's.

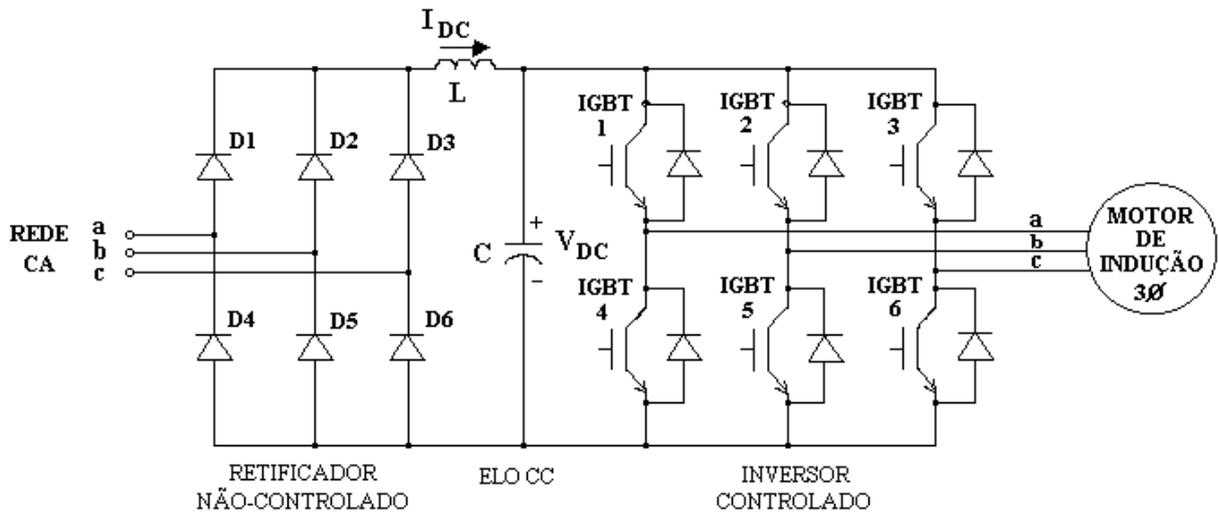


Figura 2-5 – conversor de frequência.

Fonte: LEÃO, 2001.

O retificador transmite a energia proveniente da rede para o capacitor no barramento CC, quando a tensão da rede for superior à tensão no capacitor. Com esse modo de operação entre retificador e capacitor, a corrente drenada da fonte será pulsante, logo distorcida e contendo harmônicos, conforme mostrado na figura 2-6. Por isso, o conjunto conversor de frequência e o motor, o qual ele está acionando, são vistos pelo sistema como carga não linear.

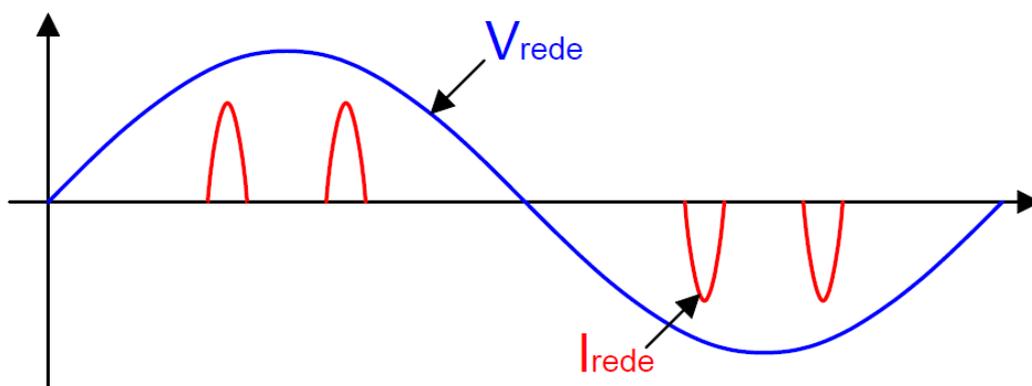


Figura 2-6 – formas de onda de corrente e tensão de entrada de uma ponte retificadora trifásica a diodos.

Fonte: própria.

Essas correntes harmônicas vão provocar o aparecimento de tensões harmônicas na rede devido à queda de tensão que irá surgir nas impedâncias do sistema. As distorções na onda de tensão irão prejudicar a alimentação das cargas que ficarem submetidas a estas distorções.

2.2.3.2 Reator controlado a tiristores

Os reatores controlados por tiristores (RCT) são dispositivos controlados eletronicamente, bastante empregados como compensadores estáticos de reativos. O controle é realizado através da variação do ângulo de disparo dos tiristores que controlam a corrente através do reator. Os tiristores são chaves semicondutoras que passam a conduzir quando se aplica um pulso no gatilho (*gate*). A condução pelo tiristor se interrompe naturalmente quando a corrente cai abaixo de um valor mínimo (corrente de manutenção), que tipicamente corresponde a uma fração de por cento de sua corrente nominal. Aplicações a partir de uma tensão alternada, naturalmente tendem a levar a corrente a se inverter ($I \leq 0$), o que produz o desligamento do tiristor a cada ciclo da rede.

Em reatores ideais (perdas nulas), a corrente através do reator, para um determinado ângulo de disparo, assume a forma descontínua.

A descontinuidade da corrente introduz uma série de harmônicas que dependem do ângulo de disparo.

Em um reator ideal, sem perdas, a corrente absorvida da rede tem, para um determinado ângulo de disparo, a descontinuidade mostrada na Figura 2-7. Essa absorção descontínua da corrente gera uma série de harmônicas que dependem do ângulo de disparo α .

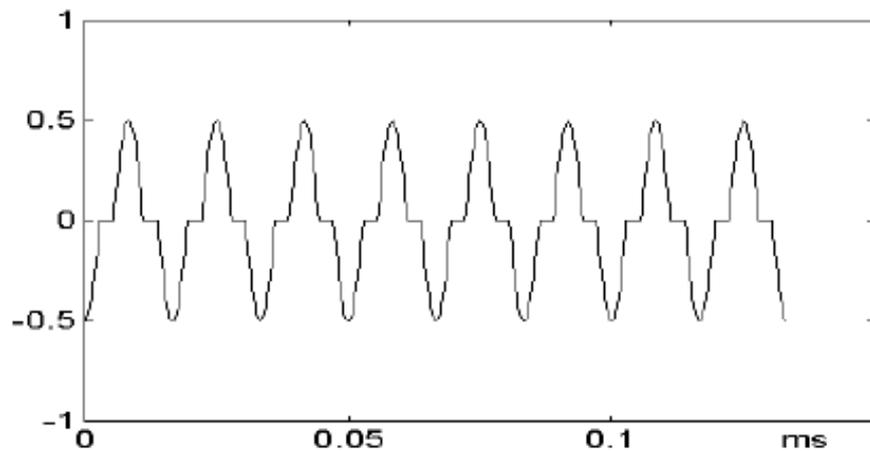


Figura 2-7 – forma de onda da corrente de fase de um RCT.

Fonte: POMILIO, 2010.

Para impedir a propagação pela rede dos harmônicos múltiplas de 3ª ordem, utiliza-se a conexão do RCT em triângulo. Assim, reduz-se o conteúdo dos harmônicos nas correntes de linha, e se evita a utilização de filtragem desses harmônicos na rede (POMILIO,2010).

2.2.3.3 Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes, desde sua introdução no mercado, se destacam pela confiabilidade que passam ao consumidor final, nos quesitos que mais os atraem: luminosidade e economia.

Pelo motivo da maior necessidade de iluminação, a introdução de modelos compactos, a fabricação em larga escala e a redução no valor, faz com que as lâmpadas fluorescentes venham substituindo as lâmpadas incandescentes.

Na área de eficiência energética, ficam claras as vantagens das lâmpadas fluorescentes quando comparadas com as lâmpadas incandescentes. Porém em relação à qualidade de energia elétrica as lâmpadas fluorescentes apresentam um resultado insatisfatório, devido ao surgimento de distorções indesejadas na rede. As distorções são compostas de frequências múltiplas ou submúltiplas da fundamental.

Para realizar uma análise dos harmônicos presentes no sistema elétrico, é necessário ter um conhecimento das origens das distorções. E com estudos realizados na área de geração de harmônicos, pode-se verificar que as lâmpadas fluorescentes têm uma grande contribuição na introdução de distorções indesejadas nas redes de distribuição de energia.

As lâmpadas fluorescentes tubulares (LFT) são compostas por um tubo de vidro revestido de material a base de fósforo, preenchido com gás a baixa pressão. Para proporcionar seu funcionamento correto, as LFT requerem o emprego de alguns acessórios, como starter e reator. Existem ainda as LFC (lâmpadas fluorescentes compactas), que se mostram mais adequadas para uso doméstico, devido às suas dimensões reduzidas e à facilidade de instalação.

O princípio de funcionamento, tanto nas LFT quanto nas LFC, baseia-se em descargas elétricas bruscas para a ionização do gás, formação do arco no ambiente gasoso e excitação do fósforo. Enquanto nas lâmpadas fluorescentes tubulares o acionamento depende do reator e do starter, as lâmpadas fluorescentes compactas geram as descargas a partir de circuitos eletrônicos. As LFT também podem utilizar reatores eletrônicos, amplamente empregados atualmente.

As lâmpadas florescentes, tanto as tubulares ou as compactas, apresentam um baixo fator de potência, além de possuir uma considerável taxa de distorções harmônicas de corrente inseridas no sistema, devido aos chaveamentos dos circuitos eletrônicos.

Logo, as lâmpadas fluorescentes causam distorções na forma de onda da corrente na rede, o que, em níveis baixos, poderia não representar um problema. Porém, em níveis altos, a circulação da corrente distorcida em elementos resistivos dará origem a tensões que, somadas à fundamental, provocarão alterações na onda de tensão fornecida. Isso ocorre quando há um grande número de lâmpadas fluorescentes na instalação elétrica.

2.2.3.4 Eletrônicos

Encontramos nas residências e centros comerciais uma grande quantidade de eletrônicos que apresentam altos níveis de taxa de distorções harmônicas. Isso ocorre devido a sua forma de conversão CA-CC utilizada na fonte de alimentação: ponte de diodos com filtro capacitivo, tendo essa categoria de eletrodomésticos como a principal fonte de harmônicos na rede de distribuição (PIRES, 2010).

2.3 FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICOS

O aumento de distorções harmônicas na rede elétrica em função das cargas não lineares compromete a qualidade de energia na instalação. Entretanto, o uso de filtros tem se tornado mais frequente. Ele tem por finalidade mitigar as distorções em uma faixa de frequência desejável e quando se trata de problemas de perturbação e se deseja evitar a penetração de certo valor de frequência, o uso de filtro de harmônicos é a solução mais sensível (KIMBARK, 1971).

O filtro passivo é formado por reatâncias resistiva (R), indutiva (L), e capacitiva (C), dispostas em série e/ou paralelo conforme a finalidade.

As reatâncias X_L e X_C , indutiva e capacitiva respectivamente, variam conforme a frequência segundo as fórmulas abaixo.

$$X_L = \omega L \quad (8)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

O filtro também fornece uma parcela de potência reativa para a rede, na qual foi conectado, devido ao seu componente capacitivo. A potência reativa fornecida pelo filtro, na frequência fundamental, define o tamanho do mesmo (ARRILAGA, WATSON, 2003).

2.3.1 Filtros shunt

Esse tipo de filtro propicia uma impedância baixa para os harmônicos de frequência para o qual foi projetado, e ao invés da corrente passar pela rede, tende a passar pelo filtro.

É possível escolher uma faixa de harmônicos, a ser filtrada, alterando os parâmetros indutância e capacitância.

Um tipo de filtro utilizado é o shunt de primeira ordem, cujas impedâncias R,L e C são ligadas em série conforme figura 2-10.

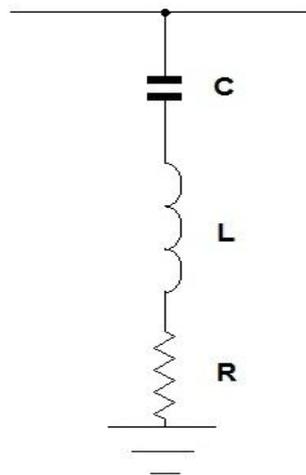


Figura 2-8 – filtro shunt de primeira ordem.

Fonte: própria.

2.3.2 Fator de dessintonia

Fator de dessintonia é o desvio entre a frequência harmônica circulante na rede a ser mitigada e a frequência a qual o filtro é sintonizado, dependendo dos elementos que compõem o filtro, frente as suas condições reais de funcionamento, que poderão interferir em seu desempenho de operação.

A utilização do fator de dessintonia é, basicamente, por três motivos (TEIXEIRA, 2009):

- A frequência fundamental pode apresentar oscilações, e por esse motivo, deslocar no tempo as componentes harmônicas;

- Algumas condições de operação, e fatores externos, podem afetar nos valores de capacitância e indutância dos elementos do filtro. Dentre eles, o capacitor sofre mais com efeitos externos, podendo perder suas características físicas mais rapidamente, quanto maiores forem os esforços de corrente e tensão sobre eles;

- Desvio de frequência devido às tolerâncias dos próprios reatores e capacitores.

2.3.3 Fator de qualidade

O que define a intensidade de sintonização é o grau de qualidade Q , relação entre impedância capacitiva, ou indutiva, e a resistência. Quanto menor o R , ou seja, maior o Q , melhor será a sintonização do filtro.

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (10)$$

2.3.4 Ressonância

O efeito ressonância caracteriza-se pela variação não linear da impedância equivalente num certo ponto do circuito, em função da frequência produzida por uma determinada carga especial (CPFL, 2002).

Esse feito ocorre quando as impedâncias, indutiva e capacitiva, possuem o mesmo valor para uma determinada frequência (frequência de ressonância); assim, certos harmônicos podem ser amplificados provocando danos aos capacitores e

podendo levá-los até a explosão (PROCOBRE, 2001). Também podendo causar sobretensão ou sobrecorrente, dependendo do arranjo série ou paralelo do circuito L-C.

2.3.4.1 Frequência de ressonância

A frequência de ressonância ocorre quando, na circulação de corrente alternada, a impedância indutiva iguala-se com a capacitiva.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

2.3.4.2 Ressonância série

Em uma situação de ressonância, considerando que a impedância indutiva, capacitiva e uma pequena resistência interna do indutor estão em série, obtemos o diagrama fasorial de tensão conforme figura 2-11.

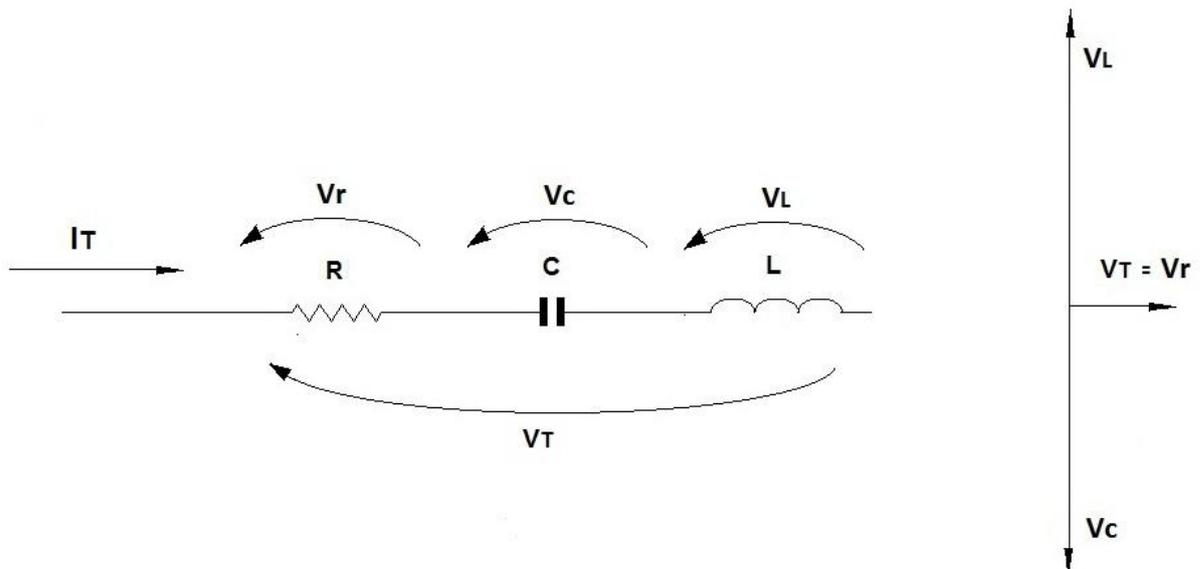


Figura 2-9 – diagrama fasorial da ressonância série.

Fonte: própria.

Nesse caso, a tensão em cima do capacitor e em cima do indutor é mais elevada que no conjunto todo; logo, uma ressonância série causa uma sobretensão nos elementos L e C.

Pode-se definir o ganho de tensão (Q_v) como a proporção da queda de tensão na impedância L (V_L) em relação à queda de tensão total do circuito RLC série (V_T):

$$Q_v = \frac{V_L}{V_T} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (12)$$

2.3.4.3 Ressonância paralela

Quando na instalação há uma impedância indutiva em paralelo com uma capacitiva, de mesmo valor para uma determinada frequência, a fonte geradora de

harmônico enxerga uma impedância muito elevada. Logo a corrente fornecida é baixa, porém a corrente que passa entre a indutância e a capacitância em paralelo é muito elevada. Podemos observar esse fenômeno no diagrama fasorial da figura 2-12.

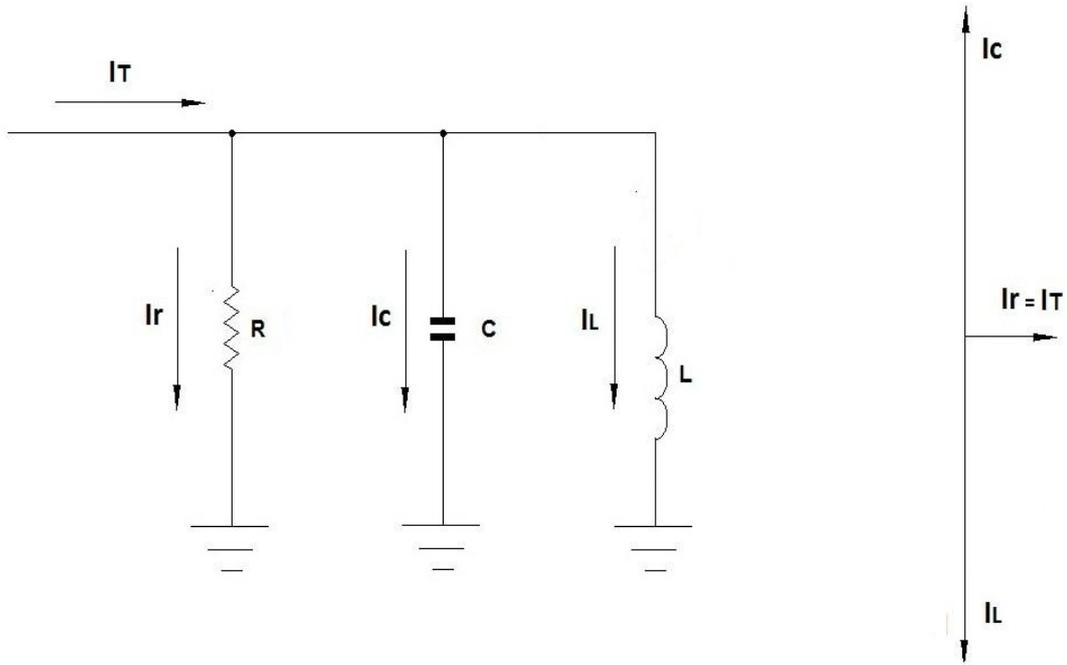


Figura 2-10 – diagrama fasorial da ressonância paralela.

Fonte: própria.

Assim, as ressonâncias paralelas podem causar sobrecorrentes nos componentes do sistema elétrico (CPFL, 2002).

2.4 SISTEMA DE TARIFAÇÃO

2.4.1 Introdução

O entendimento da forma como é cobrada a energia elétrica e como são calculados os valores apresentados nas faturas de energia elétrica é de grande importância para a tomada de decisão em relação a projetos de eficiência energética e gastos financeiros com consumo de energia em horários e períodos onde os valores de tarifa são mais elevados.

A conta de energia elétrica mostra o modo como a energia é utilizada e sua análise por um período de tempo adequado, permite estabelecer relações importantes entre hábitos e consumo.

Com as alternativas de enquadramento tarifário disponíveis para alguns consumidores, o conhecimento da formação da fatura e dos hábitos de consumo, permitem escolher a forma de tarifação mais adequada, o que resulta em menor despesa com a energia elétrica.

Porém a mudança da modalidade tarifária e dos valores de contrato, não proporciona diretamente uma redução do consumo de energia elétrica da instalação. Ela pode proporcionar uma economia de recursos financeiros, uma vez que a estrutura tarifária atual onera o custo da energia em horários do dia e períodos do ano, cujas condições de fornecimento são mais críticas. Esse foi um dos principais objetivos do Governo Federal quando, em 1982, implantou o sistema tarifário com modalidades tarifárias diferenciadas baseadas nos custos marginais de operação e de expansão do sistema elétrico (ELETROBRÁS, 2002).

A análise tarifária deve ser realizada sempre que as características de consumo da instalação sofrerem modificações sejam elas causadas por mudanças de hábitos de uso, por alterações na potência instalada de algum de seus usos finais, ou utilização de geração própria no horário de maior demanda da concessionária, onde a tarifa é diferenciada.

2.4.2 Classificação dos consumidores

As unidades consumidoras são classificadas pelo nível de tensão em que são atendidas, e são divididas em dois grupos. Um grupo que atende os consumidores em baixa tensão e outro grupo em média tensão.

Grupo A: unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 2.300 V, com fatura de energia calculada segundo tarifas binômias (conjunto de tarifas de fornecimento constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável), com componentes à demanda de potência e consumo de energia (COPEL, 2007).

Grupo B: unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2.300 V. A fatura é calculada somente a partir do consumo de energia, razão pela qual é denominada monômnia (tarifa de fornecimento de energia elétrica constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa) (COPEL, 2007).

No grupo A encontramos os consumidores, como indústrias, shopping centers e alguns edifícios comerciais.

Esse grupo é dividido em subgrupos de acordo com a tensão de fornecimento (ANEEL, 2010), como é demonstrado abaixo:

- a) subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV; e
- f) subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

O grupo B é dividido em subgrupos, de acordo a atividade do consumidor. E podemos encontrar consumidores em baixa tensão, como residências, lojas, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais e boa parte dos edifícios comerciais. Os subgrupos são classificados de acordo com a Resolução ANEEL N° 414, de 09 de setembro de 2010:

- a) subgrupo B1 – residencial;
- b) subgrupo B2 – rural;
- c) subgrupo B3 – demais classes; e
- d) subgrupo B4 – Iluminação Pública.

2.4.3 As vantagens do uso de grupo gerador no horário de ponta

Como vimos, a fatura de energia é cobrada por demanda e consumo, nos horários de ponta e fora de ponta.

Constatamos que em média, a tarifa cobrada pela demanda na ponta é três vezes maior que a tarifa cobrada pela demanda fora dela. E o valor da tarifa sobre o consumo na ponta é em média o dobro da tarifa fora de ponta, para os consumidores da classe A4, onde se encontra a maioria das instalações comerciais e comerciais de grande porte (shopping center, mercados e etc.). A tarifa de ultrapassagem é três vezes a tarifa básica, ou seja, ultrapassagem na ponta é igual a nove vezes a tarifa básica e ultrapassagem fora de ponta é igual à tarifa básica do horário de ponta.

A viabilidade de eliminar as tarifas cobradas no horário de ponta, com aplicação de grupo gerador, se torna muito atraente para consumidores onde não é possível ter uma redução das cargas no horário de pico. Com a geração própria não será necessário contratar e consumir energia da concessionária nesse período de tarifas elevadas.

Para não contratar demanda no horário de ponta o consumidor deve escolher a tarifa horossazonal verde e caso necessite consumir energia no horário de ponta, não pagará por demanda neste horário. Entretanto, a tarifa de consumo será muito maior que a tarifa do horário fora de ponta devido à tarifa de ultrapassagem.

Sempre é possível avaliar as possíveis reduções de custos com a utilização de grupo gerador, através de um estudo de viabilidade. Para realizar esses estudos são necessárias as faturas de energia do consumidor, desde que

essas representem a real situação da instalação elétrica. De forma geral, há uma redução na fatura de energia, resultado direto da eliminação das tarifas de demanda e consumo na ponta. Entretanto são observados outros fatores benéficos a instalação elétrica, tais como correção do fator de potência e otimização do fator de carga (relação entre demanda média utilizada e a máxima registrada, em certo período) devido à contratação de um valor adequado de demanda.

Grande parte dos consumidores onde não é possível eliminar a demanda e o consumo no horário de ponta, a substituição da energia da concessionária por energia provenientes de geração própria pode representar até quarenta por cento do valor da fatura de energia elétrica e justificar o investimento em grupo gerador.

2.5 GERADORES SÍNCRONOS

Geradores síncronos são máquinas capazes de converter energia mecânica em energia elétrica. A energia mecânica pode ser proveniente de diversas fontes, como hidráulica, combustão, eólica, etc. Tal transformação se dá através de uma máquina primária, que acionada mecanicamente produzirá, através de campos de indução eletromagnéticos no interior dos geradores, ondas senoidais de tensão com uma frequência fixa, e com uma amplitude definida pela classe de tensão do gerador. A divisão básica de um grupo gerador se dá em três partes: motor, alternador (nessa bibliografia mencionado como gerador) e sistemas de proteção.

Outra divisão que pode ser feita para os geradores, é com relação ao seu regime de operação, que são divididos em três: “*Stand-by*”, “*Prime*” e Contínuo. Esses regimes são determinados considerando os fatores de carga do grupo gerador. A diferença básica entre eles é o de que o regime “*Stand-by*” é o definido como regime de emergência: ele atuará apenas em caso de falha da concessionária ou no fornecimento de energia elétrica e é estabelecido de acordo com a potência efetiva contínua limitada ao gerador instalado. O regime contínuo é definido como aquele em que o motor pode operar com uma carga constante de forma contínua. E o regime “*Prime*”, que é o alvo do estudo desse trabalho, é o regime onde o GMG opera para suprir alguma necessidade da instalação, no caso, no horário de ponta, e é estabelecido sobre a potência efetiva contínua não limitada.

2.5.1 Causas dos harmônicos em grupos gerador

A maioria das aplicações de energia elétrica necessita de contínuo fornecimento e boa qualidade de energia. O sistema elétrico da concessionária supre as necessidades (de boa qualidade de energia) que as cargas precisam, tais como as características mais próximas de um barramento infinito: impedância tendendo a zero, frequência e tensão constante e forma de onda puramente senoidal (KUMAR, 2004).

Porém, no caso de GMG's, seu desempenho é consideravelmente menor comparado ao da concessionária. Isso se deve ao fato de que as características das cargas irão influenciar no desempenho do grupo gerador, e as cargas não lineares são as que mais afetam. Isso ocorre, pois as correntes distorcidas geradas por essas cargas fluirão pelas impedâncias da rede gerando quedas de tensão acarretando em diversos problemas (CATERPILLAR, 2008), explanados nos próximos tópicos desse trabalho.

2.5.1.1 Aquecimento

Componentes harmônicos, de tensão e de corrente, podem estimular oscilações mecânicas em sistemas motor-gerador, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas.

Os harmônicos reduzem a capacidade do sistema. Isto ocorre com o aumento dos valores médios de corrente e ao aumento do estresse térmico, devido ao efeito pelicular que os harmônicos impõem aos geradores. O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é tida como de 5% a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal (CATERPILLAR, 2008).

As correntes harmônicas produzidas pelas cargas não lineares causarão uma queda de tensão e uma alta variação da frequência do fluxo que irão gerar sobreaquecimentos nos enrolamentos de amortecimento e no núcleo do estator. Esse aquecimento acontece em função das perdas resistivas e varia de acordo com o quadrado da corrente eficaz do gerador. Em geral, os geradores são projetados e construídos para operar com a frequência fundamental do sistema, e por esse motivo sua construção é feita com materiais que suportem altas temperaturas justamente visando esses sobreaquecimentos que podem ocorrer (KUMAR, 2004).

Há um problema no gerador em relação aos seus condutores, que quando ocorre um aumento percentual da corrente de terceira harmônica em relação à nominal, acontecerá um aumento do aquecimento relativo a esse percentual, o que

significa que deve ser feito uma desclassificação do gerador na mesma proporção em que aconteceu o aquecimento (CATERPILLAR, 2008).

Como resultado dos harmônicos, também haverá perdas no rotor decorrentes das correntes harmônicas induzidas nos enrolamentos do gerador. E a reatância subtransitória X''_d , utilizada, pois na condição de variações de tensão o fluxo da máquina não consegue variar instantaneamente (CHAIRMAN, 1993), é um dos primeiros fatores que vai indicar a quantidade de distorção harmônica que foi gerada pelas cargas não lineares, isso porque a corrente irá reagir com a impedância causando uma queda de tensão (CATERPILLAR, 2008).

Outro efeito que influencia muito no aquecimento é o bloqueio harmônico que alguns equipamentos possuem. Por exemplo, lâmpadas fluorescentes e computadores geram uma grande quantidade de distorções harmônicas, porém esse tipo de equipamento necessita de um condutor neutro sobre dimensionado, mas a maior parte deles já é projetado para atenuar as harmônicas antes de sua chegada ao gerador (CATERPILLAR, 2008).

Os harmônicos favorecem o sobre dimensionamento do GMG nas instalações, pois quanto maior a potência do gerador menor será o efeito dos harmônicos sobre ele, e também menor sua desclassificação, sendo na mesma proporção percentual do aquecimento causado pelas distorções harmônicas no gerador.

2.5.1.2 Efeitos no regulador de tensão

O regulador de tensão é o responsável pelo valor de tensão nos terminais do gerador através do controle de corrente de campo. Esse controle é feito conforme a leitura da tensão nos terminais do GMG comparado com o valor definido, e ,então, regula a corrente de campo com o intuito de corrigir a diferença de tensão (CATERPILLAR, 2008).

Os harmônicos gerados pelas cargas não lineares causarão um erro nos instrumentos de leitura, como exemplo a leitura do AVR (regulador automático de

tensão). Esse sensoriamento é a parte mais importante da regulação (KUMAR, 2004), pois erros acarretarão em uma tensão indesejada na saída.

A maioria dos AVR`s faz a leitura da tensão em apenas uma fase, e poucos lêem entre duas fases, ou lêem em três e então feita a média. O valor eficaz da tensão pode ser calculado utilizando um conversor eletrônico DC, porém a maioria dos reguladores utiliza onda completa retificada de valor médio e assume fator 1,11 para convertê-la em eficaz. Esse fator é utilizado pelos instrumentos de medição, pois ele relaciona o valor eficaz com o valor médio em meio período de um sinal, considerado senoidal (PROCOBRE, 2001). Como as distorções aumentam o valor eficaz, a sua relação com o valor médio do sinal retificado será diferente, o que causará erro no processamento dos valores medidos nos instrumentos de medição.

Logo, isso irá resultar uma tensão do GMG regulada a níveis errados se consideradas as distorções harmônicas nos terminais de tensão. Projetos modernos utilizam filtros para monitoramento das tensões, fazendo medições nas três fases, e com valor eficaz calculado, para evitar problemas na regulação de tensão no caso do GMG alimentar cargas não lineares (KUMAR, 2004).

Há outro problema que pode ocorrer com a unidade de controle de velocidade do GMG ao alimentar os conversores SCR, isto é, disparos de tiristores na carga. O sistema de controle do GMG necessita de um sinal de realimentação. Esse sinal, utilizado pelo controle de velocidade, é geralmente o mesmo utilizado pelo regulador de tensão, e geralmente analisa a frequência da tensão nos terminais. O cálculo dessa frequência envolve passagens por zero da forma de onda as quais devem ocorrer a mais ou menos num intervalo de 8,33 ms, assumindo operação de 60 Hz. Mas na presença de certo grau de tensão e transitórios do tiristor, essa passagem por zero ocorrerá com mais frequência dentro de um ciclo da forma de onda AC. Isso leva a uma larga magnitude de erros aleatórios no sinal da frequência gerada pelo AVR (KUMAR, 2004). Portanto o sistema de regulação fica “confuso”, e resulta na instabilidade da sua velocidade.

2.5.1.3 Prevenções de harmônicos nas construções de GMG.

Quanto mais harmônicos circulantes pelo gerador, maior será a deformação na tensão em sua saída. Para reduzir esses efeitos harmônicos nos terminais de saída, fabricantes realizam algumas medidas na construção do grupo gerador. As principais medidas são realizadas nos enrolamentos e nas ranhuras.

Passo fracionário dos enrolamentos de armadura é muito utilizado, isto é, o enrolamento possui menos de 180 graus elétricos. Dois terços de passo é um dos mais utilizados por fabricantes. Essa medida ajuda a redução de harmônicas de terceira ordem (CATERPILLAR, 2008). Fazer com que os enrolamentos sejam mais simétricos possíveis ajuda na obtenção de uma tensão na saída mais perto de uma senóide.

Outra medida também relevante é em relação a inclinação das ranhuras no estator. Na construção do GMG, as ranhuras do gerador podem ser inclinadas em relação a linha do eixo do rotor, isso faz com que o impacto da distribuição do gap na densidade do fluxo do campo magnético pelos polos seja menor (CATERPILLAR, 2008), com isso haverá uma maior uniformidade do torque, menor ruído audível e um melhor sinal de tensão nos terminais.

2.5.2 Harmônicos e capacitores

É comum o uso de capacitores shunt (ligados diretamente a terra) em instalações elétricas com o objetivo de melhorar o fator de potência e em filtros com a finalidade de otimizar a qualidade de energia. Apesar dos capacitores não gerarem distorções nas formas de onda, têm grande influência em níveis de harmônicos, fornecendo condições para possíveis ciclos ressonantes com elementos indutivos (CHAIRMAN, 1993), o caso de quando é alimentado por um grupo gerador.

Deve ser considerada a impedância do gerador quando este está em paralelo com o banco, pois se o capacitor entrar em ressonância com a impedância indutiva do gerador, com valores próximos a frequência harmônica que circula na

carga, irá gerar grandes correntes e/ou tensões, isto é, haverá troca de grande quantidade de energia, podendo ocasionar a queima do banco de capacitores.

Capacitores expostos a harmônicos irão ter aquecimento adicional e altos stress dielétricos. IEEE Standard 18-2002 limita valores de tensão, corrente e potência reativa para banco de capacitores, os quais podem ser usados para determinar o máximo nível de harmônicos aceitáveis. Com esses padrões o capacitor pode ser operado continuamente com as seguintes limitações, incluindo as componentes harmônicas.

- 110% da tensão eficaz;
- 120% do valor de pico da tensão;
- 135% da corrente eficaz;
- 135% da potência reativa.

Com o intuito de suprir as correntes harmônicas é comum sobre dimensionamento de capacitores shunt, mas vários outros problemas podem aparecer tais como queima de seus fusíveis e falha na unidade capacitiva.

Quando a corrente harmônica atingir valores acima dos aceitáveis, algumas prevenções podem ser adotadas.

Realocação dos capacitores, essa medida pode reduzir o sobreaquecimento devido ao efeito de ressonância. As cargas geradoras de harmônicos e os bancos de capacitores não devem estar conectados no mesmo barramento.

Caso as falhas persistirem, é necessário adicionar um reator sintonizado. Seu objetivo é ajustar a freqüência de ressonância fora da freqüência de corrente e da tensão harmônica.

A impedância capacitiva decresce com o aumento da freqüência. Onde a corrente no capacitor será:

$$I_{\%} = nV_{\%} \quad (13)$$

Onde $I_{\%}$ é a porcentagem harmônica de corrente, n é o ordem do harmônico e $V_{\%}$ é a porcentagem de tensão harmônica. Por exemplo, se a tensão harmônica no capacitor tem 15 % da sétima componente harmônica, a corrente do capacitor será 105%. Isso demonstra porque problemas de queima de fusíveis em capacitores pode ser um sintoma de problemas de harmônicos na rede.

Capacitores em filtro de harmônico permitem o controle de distorções harmônicas assim como correção de fator de potência. Para uso nessas aplicações os capacitores devem seguir as limitações citadas acima. A adição de um reator aumenta a tensão capacitor por que cancela a pequena queda de tensão introduzida através do reator (CHAIRMAN, 1993). Como consequência, capacitores em filtros devem ser dimensionados em pelo menos 10% maior que a tensão nominal do sistema. Se o filtro entrar em ressonância perto da frequência harmônica presente na rede, o filtro pode drenar as harmônicas de uma carga distante (como uma pequena impedância shunt do circuito) e a capacidade de corrente dos condutores deve ser consideravelmente aumentada.

2.5.3 Proteções

O desempenho dos relés de proteção é influenciado pelas formas de ondas distorcidas, que pode ser tanto uma má operação ou até mesmo a não operação do mesmo (PIRES, 2010). O relé é programado para operar de uma forma, porém as contribuições harmônicas alteram o pico de corrente da forma de onda, o que faz com que o relé opere de uma forma diferente da esperada. Essas alterações são sentidas pelos relés que são dependentes do pico de corrente ou de passagens por zero.

O que foi apresentado trata sobre a influência dos harmônicos nas proteções. A seguir serão mostradas quais as proteções para cada um dos problemas causados pela influência harmônica no gerador.

2.5.3.1.1 Proteções contra aquecimento

Uma proteção de sobrecarga térmica do gerador tem a ver sempre, com a temperatura em que pode chegar os componentes protegidos em função da carga excessiva. As instalações não aquecem instantaneamente. Com um determinado degrau de corrente para mais, a temperatura dos componentes irão variar exponencialmente em função da sua constante de tempo de aquecimento.

Portanto, uma proteção de sobrecarga térmica, o relé 49, deverá emular as condições de aquecimento do gerador, em função da corrente que passa por ele. Os relés 49 mais modernos baseiam-se na modelagem de uma réplica térmica com base na corrente da carga aplicada ao gerador. O calor gerado será proporcional à corrente circulante ao quadrado.

2.5.3.1.2 Proteções contra falha no regulador de tensão

As mudanças que ocorrem com relação a estados operacionais, em sistemas elétricos de potência devem ser compensadas de modo a garantir estabilidade e os padrões do sistema elétrico. Nas máquinas elétricas que compõem um sistema real, as variações de tensão decorrentes dessas perturbações são protegidas por reguladores automáticos de tensão. O regulador de tensão tem como finalidade, alimentar o enrolamento de campo do gerador com corrente contínua necessária para a produção do fluxo magnético dentro da máquina, assim como controlar a tensão terminal gerada.

O princípio da funcionalidade do regulador de tensão é baseado nos controles das correntes de campo e da excitatriz do gerador, onde, podemos controlar a tensão gerada com a variação da corrente de excitação das máquinas. Nos reguladores de tensão, são estabelecidas as funções de controle e proteção, para garantir o desempenho operativo dos geradores e dos sistemas de potência aos quais são conectados.

Os reguladores de tensão, em sua maioria, por operar com parâmetros constantes, podem vir a sofrer influência por cargas não lineares. Em sua maioria, os reguladores de tensão tradicionais operam com parâmetros constantes, sendo influenciados por ações não-lineares de um processo real. Usualmente são utilizadas técnicas de controle clássico baseadas em modelos linearizados. Essas técnicas são adequadas para regiões de operações restritas. Caso exista um distúrbio que faça uma máquina ultrapassar o limite dessas regiões operacionais, os sistemas de controle convencionais deixam de ser eficientes.

3 OBJETO DE ESTUDO

3.1 ESTUDO

Para uma completa análise do comportamento de um grupo gerador em presença de cargas não lineares, devemos considerar toda a instalação elétrica a que está ligada o GMG, bem como todas as cargas a ele ligadas, e todas as distorções harmônicas geradas por essas cargas. Conforme visto no capítulo anterior, essas distorções geram problemas que podem afetar o bom funcionamento do GMG.

3.1.1 Fonte de estudo

Com o intuito de observar o fluxo harmônico em uma planta comercial em que utiliza grupo gerador, utilizou-se como base um relatório da avaliação de medições realizado por uma empresa de consultoria em energia, nas instalações de um Shopping na região metropolitana de Curitiba. Este relatório compreende medições efetuadas nos transformadores de distribuição no lado de baixa tensão, que está conectado a um grupo gerador, que fornece energia à rede no horário de ponta da concessionária.

A metodologia de medição utilizada foi a mesma adotada pela COPEL, com a integralização das grandezas elétricas num intervalo de 15 minutos. O equipamento foi programado para, no ponto de medição, medir até a harmônica de ordem 30. O ponto de monitoramento foi observado durante o período compreendido entre as 11h 30min 01seg do dia 08/04/2011 às 16h 15min do dia 13/04/2009.

O objetivo foi focado em verificar as grandezas elétricas, como tensão, corrente, fator de potência, e também os níveis harmônicos existentes no ponto de medição. As distorções harmônicas de corrente e tensão apresentadas pela

empresa no relatório nos dão margem para fazer um estudo em cima dos parâmetros, e utilizá-los numa simulação via software.

O transformador de distribuição em que foi realizada a medição possui uma potência aparente nominal de 1250 kVA, com uma tensão de entrada 13,8 kV e uma tensão de saída de 380 V fase-fase e 220 V fase-neutr.o. A distorção harmônica média detectada foi de 75,24%

3.1.2 Planta

A representação da planta será feita de uma forma simplificada, e será similar a planta em que foi realizado o estudo. Apresentaremos o diagrama unifilar do sistema elétrico do shopping apenas com os dados relevantes para o estudo dos componentes harmônicos e seus efeitos. Logo, não serão representados no diagrama equipamentos de medição, proteção e manobra, que não influenciarão no estudo em questão, assim como TC's, TP's, seccionadoras, fusíveis, etc. A planta do sistema elétrico é representada pela Figura 3-1.

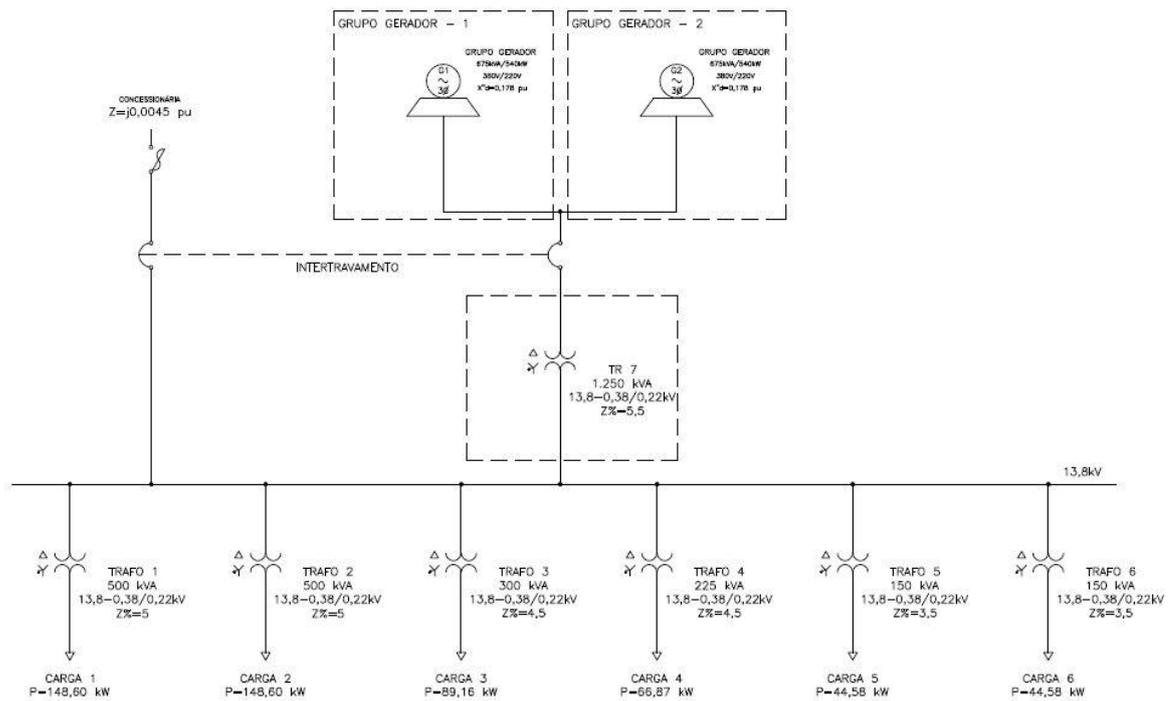


Figura 3-1 – diagrama unifilar simplificado.

Fonte: própria.

Conforme diagrama unifilar, a planta é alimentada pela concessionária em 13.800 V, e no horário de ponta comuta-se a alimentação da concessionária para os dois grupos geradores.

O barramento da carga é em 13.800 V, os geradores tem seus terminais em 380 V e transformador TR 7 liga o barramento dos geradores para o barramento da carga.

A carga possui 6 transformadores, TR1 ao TR6, que alimentam toda a carga da planta, como lâmpadas, ar-condicionado, computadores, etc.

Baseando-se pela demanda máxima, analisada pelo estudo da empresa de consultora de energia, de 542,4 kW, o consumo da carga de cada transformador é dividido pela soma ponderada em relação à potência de cada transformador. A tabela 3-1 mostra os dados dos transformadores e das cargas, como potência nominal e demandada.

Tabela 3-1 – potências e demandas dos transformadores.

| TRANSFORMADORES | (kW) | (KVA) | Demanda (kW) |
|-----------------|------|-------|--------------|
| TRAFO 1 | 460 | 500 | 148,6027 |
| TRAFO 2 | 460 | 500 | 148,6027 |
| TRAFO 3 | 276 | 300 | 89,1616 |
| TRAFO 4 | 207 | 225 | 66,8712 |
| TRAFO 5 | 138 | 150 | 44,5808 |
| TRAFO 6 | 138 | 150 | 44,5808 |
| TRAFO 7 | 1150 | 1250 | 542,4000 |

Fonte: própria.

Os valores de placa dos transformadores e dos geradores seguem na tabela 3-2.

Tabela 3-2 – valores de placa dos equipamentos.

| Equipamento | Potência (kW) | Potência (kVA) | Z (%) | Xd'' (%) |
|-------------|---------------|----------------|-------|----------|
| G1 | 540 | 675 | N/A | 17,80 |
| G2 | 540 | 675 | N/A | 17,80 |
| TRAFO 1 | 460 | 500 | 5 | N/A |
| TRAFO 2 | 460 | 500 | 5 | N/A |
| TRAFO 3 | 276 | 300 | 4,5 | N/A |
| TRAFO 4 | 207 | 225 | 4,5 | N/A |
| TRAFO 5 | 138 | 150 | 3,5 | N/A |
| TRAFO 6 | 138 | 150 | 3,5 | N/A |
| TRAFO 7 | 1150 | 1250 | 5,5 | N/A |

Fonte: própria.

3.1.3 Cálculos Preliminares

A fim de visualizar as formas de onda na barra do gerador, de acordo com os parâmetros da rede, utilizou-se a ferramenta Simulink do software Matlab 7.10 para realização das simulações.

Os equipamentos da rede deverão ser representados por suas grandezas de origem, impedâncias dos geradores e transformadores, além da própria concessionária em Henry (H), e a potência das cargas inseridas nos transformadores por resistências (Ω) e indutâncias (H).

Seguem cálculos, segundo as seguintes fórmulas:

$$Z (\Omega) = Z_n^{pu} \cdot \frac{Vb_n^2}{Sb_n} \quad (14)$$

$$L (H) = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (15)$$

$$C (F) = \frac{1}{X_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (16)$$

Considerando a impedância da concessionária no ponto de entrega como sendo $j0,0045$ pu e aplicando as fórmula a cada equipamento:

- Concessionária:

$$Z (\Omega) = 0,0045 \cdot \frac{13800^2}{1000000} = j0,8569 \Omega \quad (17)$$

Referindo-se ao lado de baixa tensão do transformador.

$$Z (\Omega) = \frac{0,8569}{\left(\frac{13800}{380}\right)^2} = j0,0006498 \Omega \quad (18)$$

$$L (H) = \frac{0,0006498}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 1,7236 \mu H \quad (19)$$

- TR 1 e TR 2:

$$Z (\Omega) = 0,05 \cdot \frac{380^2}{500000} = j0,0144 \Omega \quad (20)$$

$$L (H) = \frac{0,0144}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 38,3032 \mu H \quad (21)$$

- TR 3:

$$Z (\Omega) = 0,045 \cdot \frac{380^2}{300000} = j0,0216 \Omega \quad (22)$$

$$L (H) = \frac{0,0216}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 57,4549 \mu H \quad (23)$$

- TR 4:

$$Z (\Omega) = 0,045 \cdot \frac{380^2}{225000} = j0,0288 \Omega \quad (24)$$

$$L (H) = \frac{0,0288}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 76,6065 \mu H \quad (25)$$

- TR 5 e TR 6:

$$Z (\Omega) = 0,035 \cdot \frac{380^2}{150000} = j0,0336 \Omega \quad (26)$$

$$L (H) = \frac{0,0336}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 89,3743 \mu H \quad (27)$$

- TR 7:

$$Z (\Omega) = 0,055 \cdot \frac{380^2}{1250000} = j0,0063 \Omega \quad (28)$$

$$L (H) = \frac{0,0063}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 16,8534 \mu H \quad (29)$$

- GMG 1 e GMG 2:

$$X''_d (\Omega) = 0,178 \cdot \frac{380^2}{675000} = j0,0381 \Omega \quad (30)$$

$$L (H) = \frac{0,0381}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 101,0071 \mu H \quad (31)$$

3.2 DADOS HARMÔNICOS

Para se obter o valor da amplitude de corrente de cada harmônico a ser inserida na planta, foi coletada a contribuição harmônica do perfil de cada uma das cargas propostas na simulação.

3.2.1 Lâmpadas

As lâmpadas utilizadas para a simulação são lâmpadas fluorescentes compactas, com 23 Watts de potência da marca Osram. Por serem de alto rendimento em relação às incandescentes e por isso muito utilizada em ambientes comerciais. Seu fator de potência de 0,58 e com distorção harmônica segundo figura 3-2.

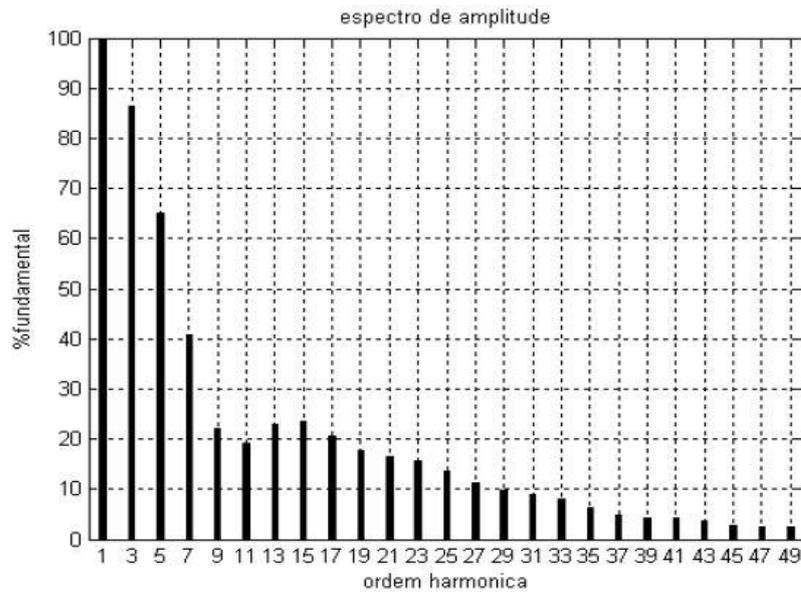


Figura 3-2 – espectro harmônico da lâmpada.

Fonte: ALMEIDA, 2004.

3.2.2 Ar-condicionado

Em se falando de um ambiente público, shopping, a presença de ar-condicionado é indispensável para manter a temperatura interna agradável, logo, é uma carga não linear de grande presença na planta em estudo.

O ar condicionado é acionado por um inversor de frequência a três fios, portanto, o espectro harmônico levado em consideração, é o do inversor.

O fator de potência do ar-condicionado utilizado é 0,987 e espectro harmônico conforme figura 3-3.

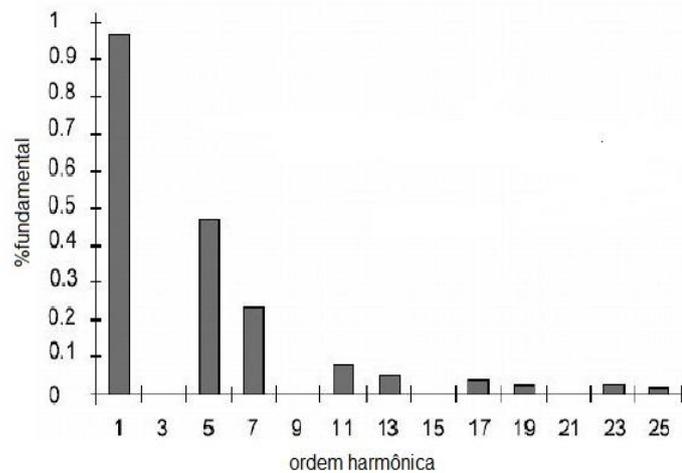


Figura 3-3 – espectro harmônico de inversor de frequência.

Fonte: ROCHA, 2006.

3.2.3 Computadores

Computadores são muito utilizados pelas lojas do shopping, como sistemas de armazenamento de informações, comunicação, entre outros.

O computador analisado é da marca Compag e possui fator de potência 0,577 e contribuição harmônica de acordo com figura 3-4.

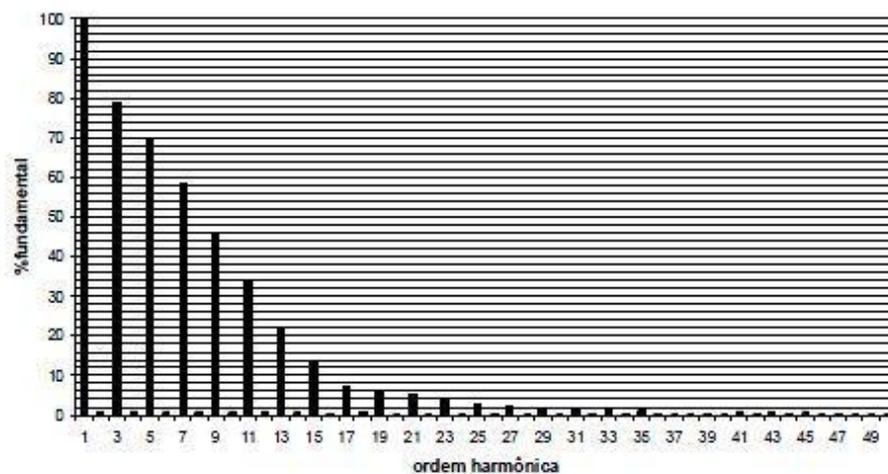


Figura 3-4 – espectro harmônico do computador.

Fonte: ALMEIDA, 2004.

3.2.4 Correntes harmônicas

Os valores de corrente a serem inseridos, foram obtidos de acordo com os perfis das cargas conectadas na rede, e também da porcentagem de cada carga em relação à potência de cada transformador.

As cargas com contribuição harmônicas mais relevantes na planta são: lâmpadas, ar-condicionado e computadores. A tabela 3-3 mostra a divisão de potência de cada tipo de carga não linear em valor porcentual da potência total. Esses valores foram arbitrados com coerência à valores reais.

Tabela 3-3 – divisão de potência por equipamento.

| | | CARGA TOTAL (kW) | CARGA 1 (kW) | CARGA 2 (kW) | CARGA 3 (kW) | CARGA 4 (kW) | CARGA 5 (kW) | CARGA 6 (kW) |
|---------------------|-----|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Iluminação | 25% | 45,2 | 12,38 | 12,38 | 7,43 | 5,57 | 3,72 | 3,72 |
| Ar- condicionado | 20% | 36,16 | 9,91 | 9,91 | 5,94 | 4,46 | 2,97 | 2,97 |
| Computadores | 20% | 36,16 | 9,91 | 9,91 | 5,94 | 4,46 | 2,97 | 2,97 |
| Cargas lineares | 35% | 63,28 | 17,34 | 17,34 | 10,4 | 7,8 | 5,2 | 5,2 |

Fonte: própria.

Para inserir amplitudes de correntes em ampères nas barras das cargas através de fontes de corrente da planta, realizamos cálculos com base nos histogramas de distorção harmônica de corrente apresentados anteriormente e com base na tabela 3-2, que mostra a potência instalada de cada carga.

Seguem os valores obtidos da amplitude de cada harmônico, de cada natureza de carga separadamente nas tabelas a seguir.

Tabela 3-4 – valor da corrente dos harmônicos em cada carga.

| | | Fontes de corrente | | | | | |
|-----------|----|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | Ih1 (A) | Ih2 (A) | Ih3 (A) | Ih4 (A) | Ih5 (A) | Ih6 (A) |
| Harmônico | 3 | 146,0878 | 146,0878 | 87,65267 | 65,7395 | 43,82634 | 43,82634 |
| | 5 | 129,2457 | 129,2457 | 77,5474 | 58,16055 | 38,7737 | 38,7737 |
| | 7 | 91,56455 | 91,56455 | 54,93873 | 41,20405 | 27,46936 | 27,46936 |
| | 9 | 57,25101 | 57,25101 | 34,3506 | 25,76295 | 17,1753 | 17,1753 |
| | 11 | 46,83647 | 46,83647 | 28,10188 | 21,07641 | 14,05094 | 14,05094 |
| | 13 | 39,89435 | 39,89435 | 23,93661 | 17,95246 | 11,96831 | 11,96831 |
| | 15 | 33,43763 | 33,43763 | 20,06258 | 15,04693 | 10,03129 | 10,03129 |

Fonte: própria.

3.2.5 Correntes de sequência zero

A corrente de sequência zero irá aparecer quando o sistema utilizar a terra como referência e ocorrer uma circulação dessa corrente por ela.

Alguns fatores devem ser observados, para determinação da existência, ou não, da corrente de sequência zero. Na não existência de um caminho fechado, para que ocorra a circulação da corrente de sequência zero, a impedância de sequência zero desse circuito será infinita. Nos transformadores em que existir um dos lados com uma conexão em delta, haverá um fluxo circulante dessa corrente de sequência zero dentro dos enrolamentos desse transformador. Uma das condições para que ocorra essa circulação, é a necessidade da circulação dessa corrente de sequência zero, em outro enrolamento desse mesmo transformador, e essa circulação deverá ocorrer no sentido oposto ao da primeira conexão (SCHWEITZER).

Como o transformador utilizado no sistema é um transformador comercial e usualmente utilizado, conexão em triângulo no primário e estrela aterrado no secundário, as correntes de terceira harmônica estarão confinadas no lado de baixa do transformador, ou seja, no lado de 380 V. Por esse motivo, todas as correntes harmônicas múltiplas da terceira, consideradas no nosso trabalho serão de sequência zero. As correntes de terceira, nona e décima quinta harmônica não circularão no gerador, apenas entre as fontes harmônicas e os transformadores, e a malha irá se fechar pelo neutro dos mesmos. E para as cargas ligadas a três fios,

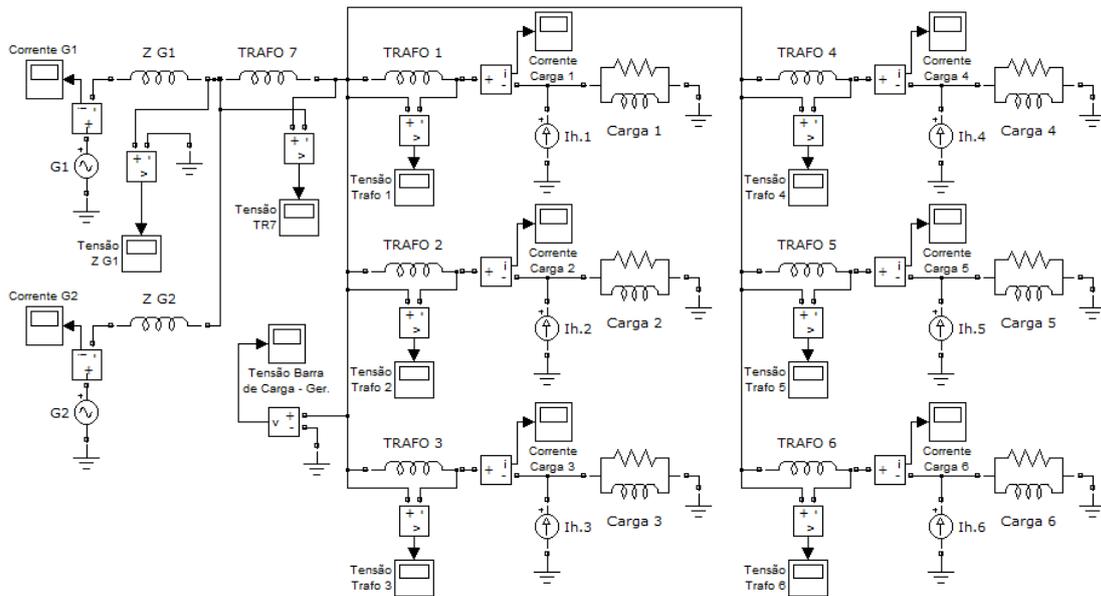


Figura 3-6 – diagrama com alimentação dos geradores.

Fonte: própria.

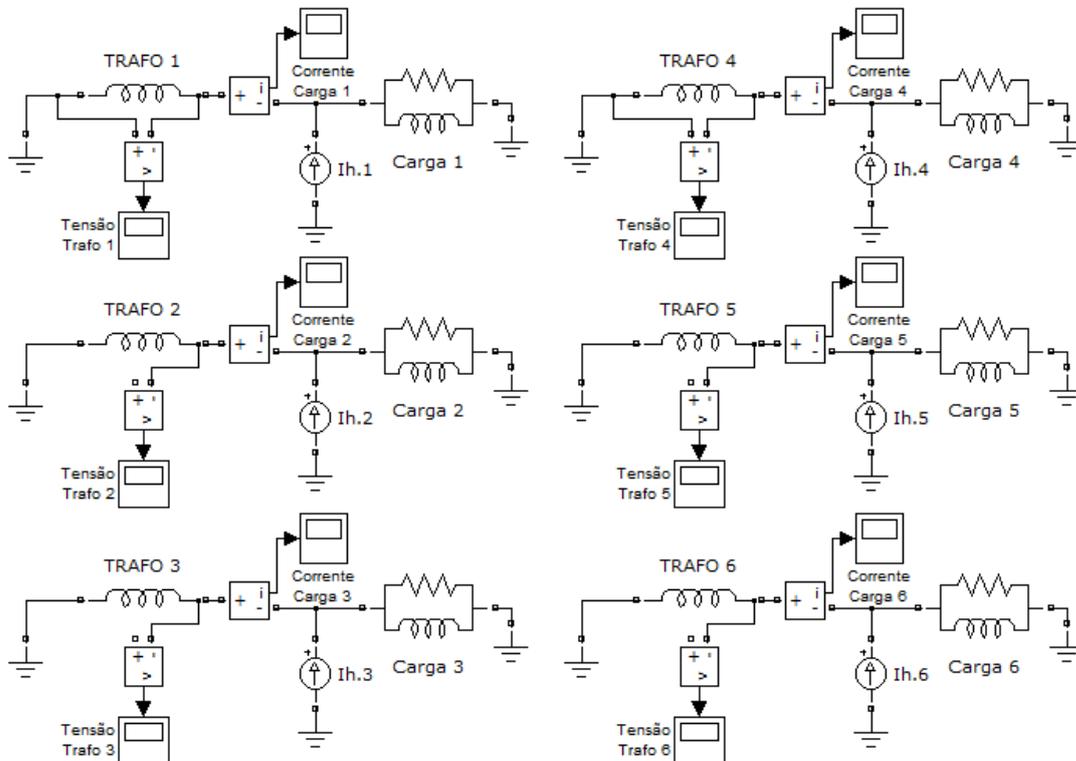


Figura 3-7 – diagrama para sequência zero.

Fonte: própria.

As análises serão realizadas com base nos valores de cada harmônico circulante na rede separadamente.

Para a frequência fundamental não se considera as fontes de corrente, somente é inserida a fonte de tensão que simula a concessionária e os geradores. No lugar das fontes de corrente abrimos o circuito. Tais fontes foram conectadas em paralelo com cada carga, com os valores de amplitude dos harmônicos variando da ordem 3 até a ordem 15, somente as ordens ímpares.

Para os harmônicos não foram consideradas fontes de tensão, que é de 60 Hz, frequência fundamental do sistema. Por esse motivo foi feito um curto-circuito à terra no lugar da fonte de tensão. As fontes de corrente foram conectadas em paralelo com cada carga, com os valores de amplitude dos harmônicos variando na ordem 3^o, 5^o, 7^o, 9^o, 11^o, 13^o e 15^o.

3.3.1 Resultados

As formas de onda de tensão obtidas com a concessionária alimentando a planta e com o grupo gerador segue nas figuras a seguir.

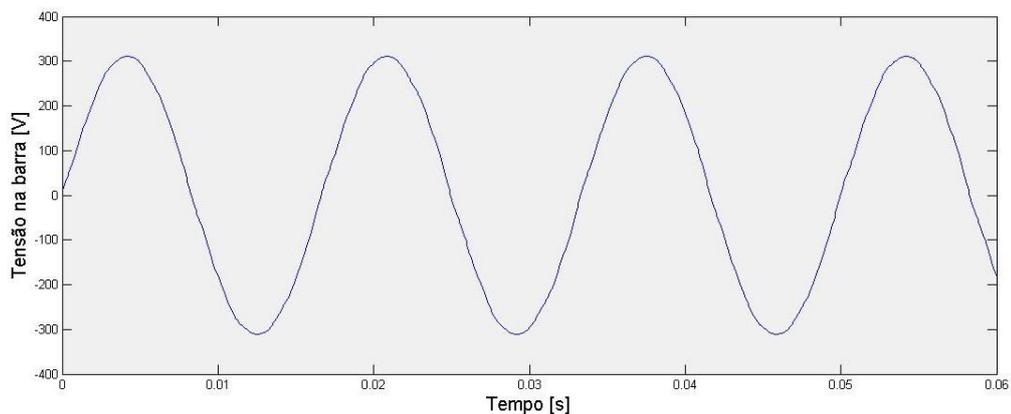


Figura 3-8 – forma de onda de tensão na barra com alimentação da concessionária.

Fonte: própria.

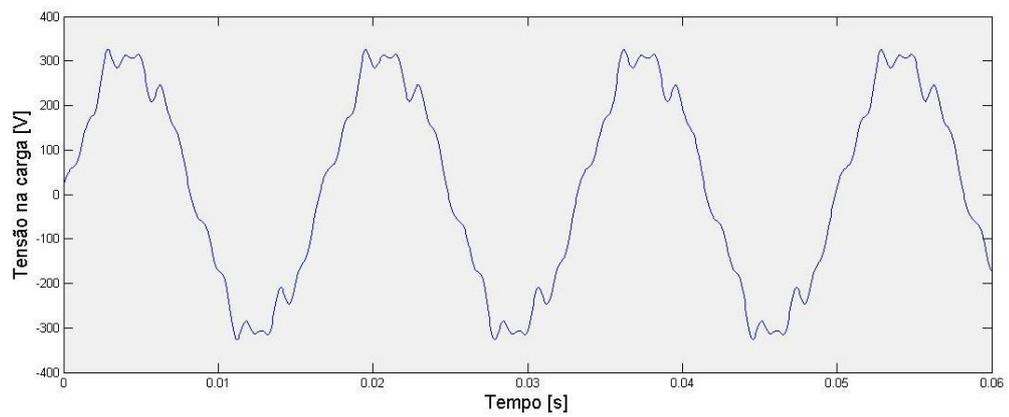


Figura 3-9 – forma de onda de tensão na carga com alimentação da concessionária.

Fonte: própria.

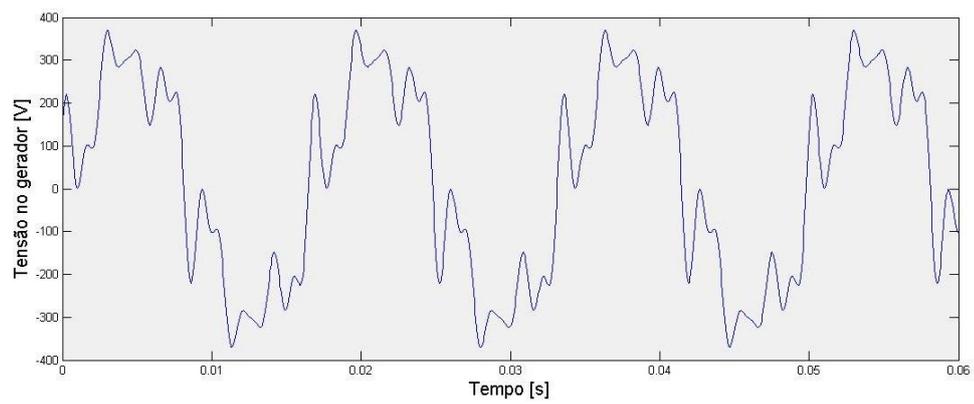


Figura 3-10 – forma de onda de tensão no grupo gerador.

Fonte: própria.

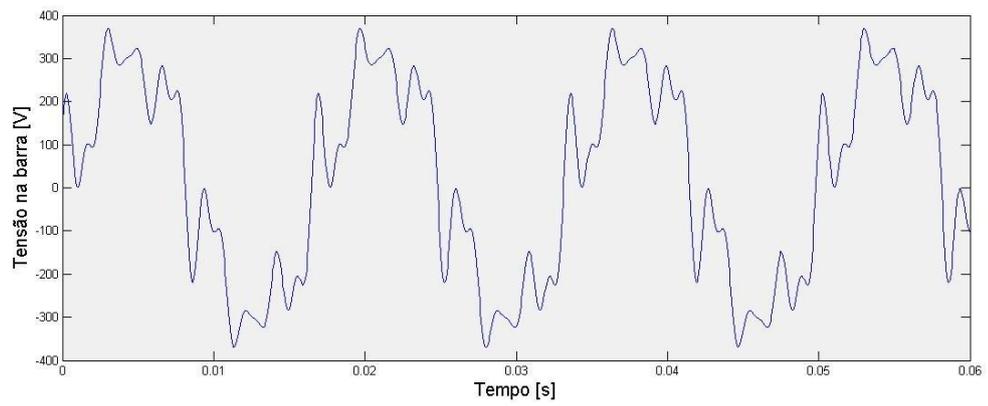


Figura 3-11 – forma de onda de tensão na barra com alimentação do grupo gerador.

Fonte: própria.

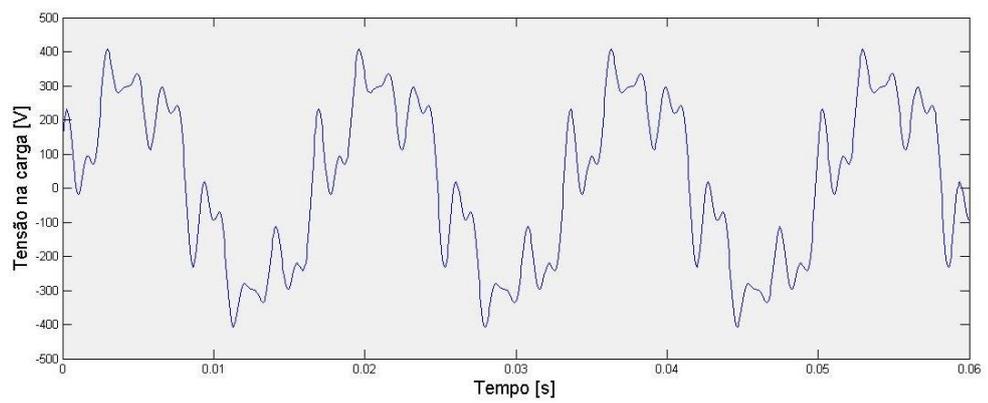


Figura 3-12 – forma de onda de tensão na carga com alimentação do grupo gerador.

Fonte: própria.

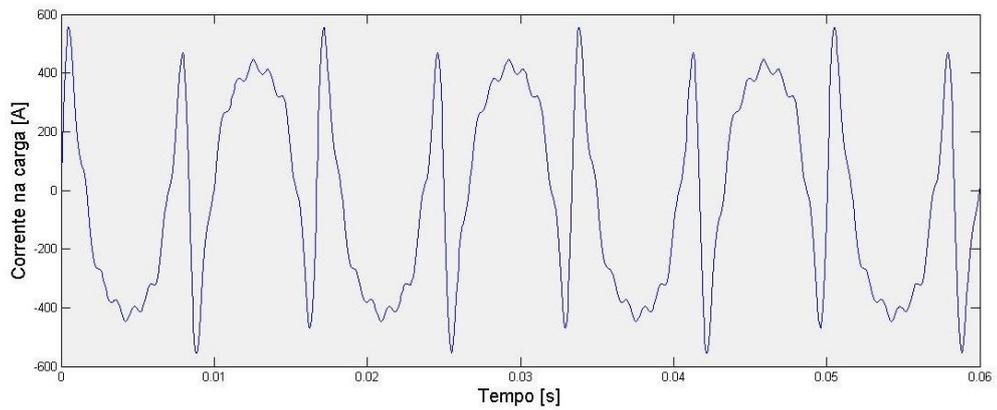


Figura 3-13 – forma de onda de corrente na carga com alimentação da concessionária.

Fonte: própria.

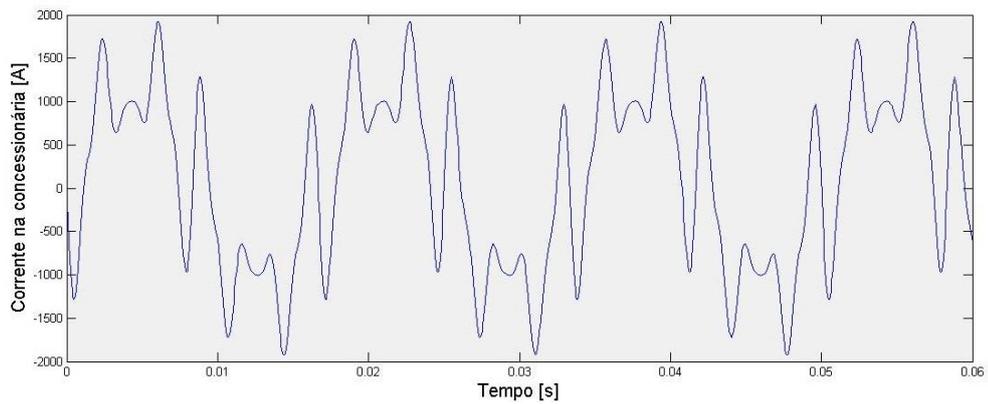


Figura 3-14 – forma de onda de corrente na concessionária.

Fonte: própria.

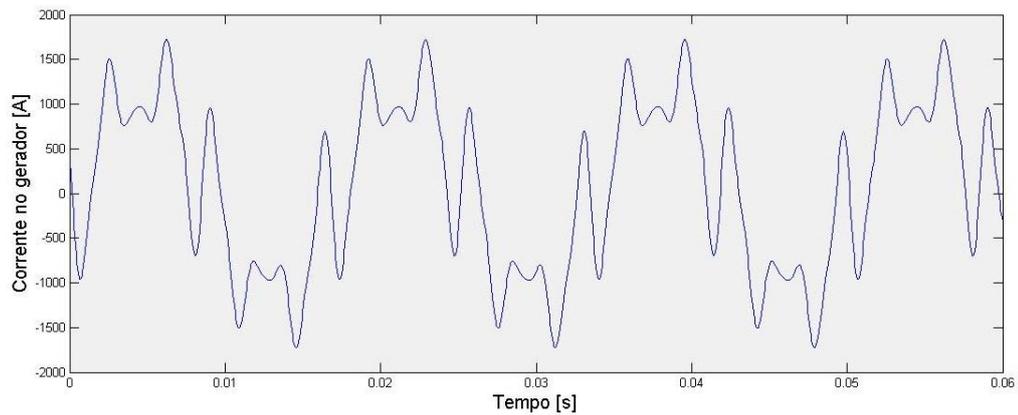


Figura 3-15 – forma de onda de corrente no grupo gerador.

Fonte: própria.

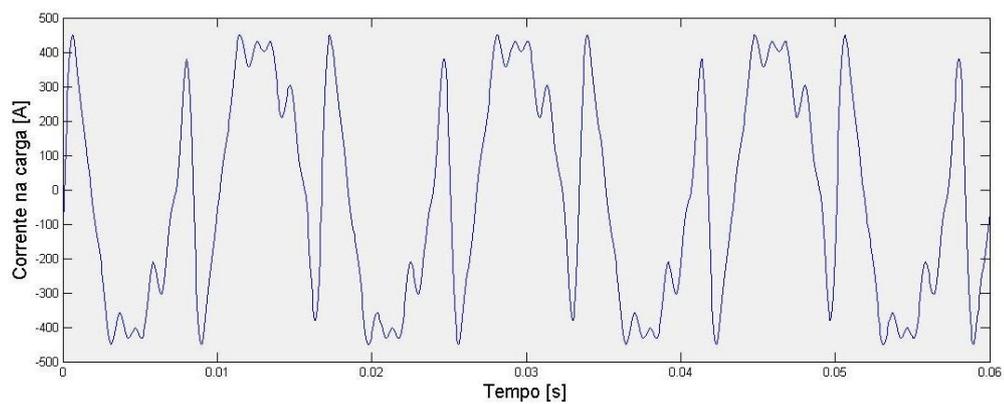


Figura 3-16 – forma de onda de corrente na carga com alimentação do grupo gerador.

Fonte: própria.

Pode-se notar que a forma de onda de tensão e corrente são mais distorcidas quando na presença do grupo gerador ao invés da concessionária. Isso se deve ao fato de que a impedância do gerador é muito maior do que a impedância da concessionária, portanto a queda de tensão harmônica será maior.

A seguir, na tabela 3-5, segue os valores de distorção de tensão e corrente obtidos das simulações geradas para a concessionária e para o grupo gerador.

Tabela 3-5 – análise de distorção harmônica de tensão e corrente.

| Ordem Harmônica | CONCESSIONÁRIA | | | GRUPO GERADOR | | | |
|-----------------|----------------|--------|--------------------------|----------------|---------|--------|--------------------------|
| | DIT (V) | | DIT (I) | DIT (V) | | | DIT (I) |
| | Barra (13,8kV) | Carga | Primário Transformador 1 | Barra (13,8kV) | Gerador | Carga | Primário Transformador 1 |
| 3 | -- | 2,87% | -- | -- | -- | 2,87% | -- |
| 5 | 0,69% | 4,90% | 56,69% | 27,28% | 17,70% | 27,28% | 49,49% |
| 7 | 0,68% | 4,83% | 40,00% | 21,16% | 15,86% | 24,45% | 31,73% |
| 9 | -- | 3,34% | -- | -- | -- | 3,34% | -- |
| 11 | 0,54% | 3,86% | 20,22% | 13,67% | 10,23% | 15,77% | 13,27% |
| 13 | 0,54% | 3,82% | 17,10% | 12,55% | 9,41% | 14,51% | 10,27% |
| 15 | -- | 3,20% | -- | -- | -- | 3,20% | -- |
| THD | 1,24% | 10,32% | 74,27% | 39,20% | 27,54% | 42,79% | 61,13% |

Fonte: própria.

Os pontos de medição de tensão da concessionária utilizados foram: na barra de média tensão e nas cargas. Para a corrente, o ponto de medição utilizado foi o primário do transformador 7.

Os pontos de medição de tensão do grupo gerador foram: na barra de média tensão, no próprio gerador e nas cargas. Para a corrente, o ponto de medição utilizado foi o primário do transformador 7.

Verificou-se que a distorção harmônica total (THD) na simulação, 74,27% está próximo do valor medido pela empresa de consultoria, 75,24%, portanto os valores arbitrados estão coerentes.

A resolução da ANEEL, o PRODIST módulo 8, cita os limites de distorção harmônica de tensão que estão ilustrados na tabela a seguir.

Tabela 3-6 – limites de distorção segundo a ANEEL.

| Ordem harmônica | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | THD (V) |
|-----------------|------|------|------|----|-------|----|----|---------|
| DIT (V) | 6,5% | 7,5% | 6,5% | 2% | 4,50% | 4% | 1% | 10% |

Fonte: própria.

Comparando os valores obtidos aos valores admissíveis, segundo o PRODIST, observamos que as distorções estão acima dos limites de distorção de tensão admissível. A resolução da ANEEL não cita limites de corrente, portanto só são comparados com a resolução os valores de tensão.

Podemos ver que a planta possui valores superiores de THD em relações as recomendações podendo afetar o desempenho dos equipamentos e máquinas interligados à rede, assim como o desempenho do grupo gerador.

Para diminuir a distorção harmônica na barra da carga e no gerador, é necessário mitigar as harmônicas de maior relevância da planta. Segundo as bibliografias e as recomendações do IEEE uma das maneiras é realizar o projeto de filtros passivos sintonizados.

3.3.2 Dimensionamento do filtro passivo sintonizado

O tipo de filtro a ser projetado será filtro passivo sintonizado em série, ou seja, R-L-C conforme a figura 2-10.

As frequências de harmônicas a serem filtrados serão a quinta e a sétima, tendo em vista que são as de maiores amplitudes. Portanto, serão conectados dois filtros passivos sintonizados em paralelo em cada carga, totalizando 12 filtros na planta.

Esse tipo de filtro trifásico possui configuração com os capacitores ligados em delta. Porém em nosso estudo, simplificaremos o filtro para valores monofásicos comerciais, ou seja, para valores dos capacitores ligados em estrela.

3.3.2.1 Correção do fator de potência

O primeiro passo é dimensionar o capacitor para corrigir o fator de potência para a menor frequência da rede, a fundamental, pois nessa frequência o valor de capacitância será maior que nas outras e, portanto o valor de potência reativa a ser entregue também será mais elevado (ARRILAGA, WATSON, 2003).

A fórmula utilizada para o cálculo dessa potência reativa é a seguinte:

$$Q_c = P. (\tan(\cos FP_a) - \tan(\cos FP_n)) \quad (32)$$

Corrigindo o fator de potência de 0,92 para 0,99 das cargas, o valor de potência reativa e capacitância calculada, segundo as fórmulas, seguem na tabela 3-6.

Tabela 3-7 – valor das potências reativas calculadas.

| | Potência (VA) | Fator de potência antigo | Fator de potência novo | Qc (var) | Qtde de filtros | Qc individual (var) |
|---------|---------------|--------------------------|------------------------|----------|-----------------|---------------------|
| CARGA 1 | 49534,25 | 0,92 | 0,99 | 14043,25 | 2 | 7021,63 |
| CARGA 2 | 49534,25 | 0,92 | 0,99 | 14043,25 | 2 | 7021,63 |
| CARGA 3 | 29720,55 | 0,92 | 0,99 | 8425,95 | 2 | 4212,98 |
| CARGA 4 | 22290,41 | 0,92 | 0,99 | 6319,46 | 2 | 3159,73 |
| CARGA 5 | 14860,27 | 0,92 | 0,99 | 4212,98 | 2 | 2106,49 |
| CARGA 6 | 14860,27 | 0,92 | 0,99 | 4212,98 | 2 | 2106,49 |

Fonte: própria.

Vale à pena ressaltar, que os valores calculados de potência reativa deverão ser divididos pela quantidade de filtros que serão utilizados, já que a somatória das cargas reativas de todos os filtros deverá ser igual à potência reativa total. Nesse caso, como estaremos trabalhando com dois filtros harmônicos para cada carga, dividiremos o valor da potência reativa em dois, um para o filtro de quinta harmônica, outro para o filtro de sétima harmônica.

3.3.2.2 Cálculo do capacitor

Para o cálculo do valor do capacitor, primeiramente devemos calcular o valor da impedância do capacitor (X_c), que é dada pela fórmula a seguir:

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \quad (33)$$

Onde V é a tensão no capacitor (220 V), e o valor de Q_c é o valor individual de cada capacitor.

Depois de calculado o valor da impedância de cada capacitor, podemos calcular o valor de cada capacitância que será utilizada em cada filtro, de acordo com a fórmula a seguir:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (34)$$

Em que a frequência utilizada é a frequência nominal do sistema, já que o fator de potência foi corrigido para essa frequência.

Após esses cálculos, obtivemos os valores calculados de capacitância a ser utilizado em cada filtro harmônico para sua respectiva carga. No entanto, devemos pegar valores comerciais de capacitores para fazer as simulações.

De acordo com o catálogo de um fabricante, com dados para valores comerciais de capacitores, conseguimos, com base nos valores calculados, obter a seguinte tabela.

Tabela 3-8 – valores de impedância do capacitor e capacitância para cada carga, na frequência fundamental, do sistema e seu respectivo valor comercial.

| | X_c (Ω) | C (Faraday) | C comercial (Faraday) |
|---------|--------------------|-------------|-----------------------|
| CARGA 1 | 6,892990 | 0,000385 | 0,000384 |
| CARGA 2 | 6,892990 | 0,000385 | 0,000384 |
| CARGA 3 | 11,488317 | 0,000231 | 0,000228 |
| CARGA 4 | 15,317755 | 0,000173 | 0,000183 |
| CARGA 5 | 22,976633 | 0,000115 | 0,000110 |
| CARGA 6 | 22,976633 | 0,000115 | 0,000110 |

Fonte: própria.

Para os cálculos a seguir, e para uso nas simulações que serão realizadas no decorrer desse trabalho, todos os valores de capacitância utilizados, terão como base os valores comerciais acima informados.

3.3.2.3 Cálculo do indutor

Conforme citado anteriormente nesse trabalho, as reatâncias indutivas e capacitivas devem estar em ressonância em uma determinada frequência, para que sejam atendidas os critérios para o dimensionamento dos filtros.

Com o valor do capacitor já dimensionado, resta agora, o cálculo do valor do indutor. A fórmula que nos dá o valor do indutor, na condição da ressonância entre as reatâncias, é dada pela fórmula 11 desse trabalho.

Para a frequência de ressonância, foi levado em consideração o fator de dessintonia, que para a quinta harmônica é de 282 Hz (IEEE, 2003), e de 402 Hz para a sétima harmônica.

Através dos cálculos realizados, obtivemos os seguintes valores de indutância para quinto e sétimo harmônico:

Tabela 3-9 – valores de indutância para quinta e sétima harmônica.

| | L para 282 Hz (mH) | L para 402 Hz (mH) |
|---------|--------------------|--------------------|
| CARGA 1 | 0,829 | 0,408 |
| CARGA 2 | 0,829 | 0,408 |
| CARGA 3 | 1,397 | 0,687 |
| CARGA 4 | 1,740 | 0,857 |
| CARGA 5 | 2,896 | 1,425 |
| CARGA 6 | 2,896 | 1,425 |

Fonte: própria.

3.3.2.4 Cálculo do resistor

A fórmula 10 desse trabalho nos permite o cálculo do resistor, que irá variar de acordo com o fator de qualidade. O fator de qualidade admitido foi de 5. Através dos cálculos realizados, obtivemos os seguintes valores de resistores para quinta e sétima harmônica.

Tabela 3-10 – valores de resistência para quinta e sétima harmônica.

| | R para 282 Hz (mΩ) | R para 402 Hz (mΩ) |
|---------|--------------------|--------------------|
| CARGA 1 | 293,95 | 206,20 |
| CARGA 2 | 293,95 | 206,20 |
| CARGA 3 | 495,07 | 347,28 |
| CARGA 4 | 616,80 | 432,68 |
| CARGA 5 | 1026,14 | 719,83 |
| CARGA 6 | 1026,14 | 719,83 |

Fonte: própria.

3.3.3 Resultados com filtros passivos sintonizados

3.3.3.1 Resultados com utilização de frequência de sintonia recomendadas pela IEEE.

Com os filtros devidamente sintonizados e conectados paralelos a cada carga, quando na presença do gerador, foram obtidas as formas de onda a seguir.

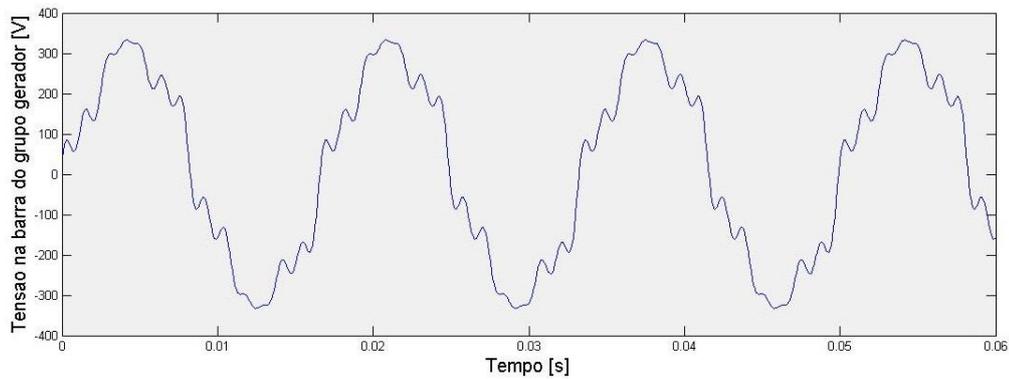


Figura 3-17 – forma de onda de tensão no grupo gerador – com filtro 1.

Fonte: própria.

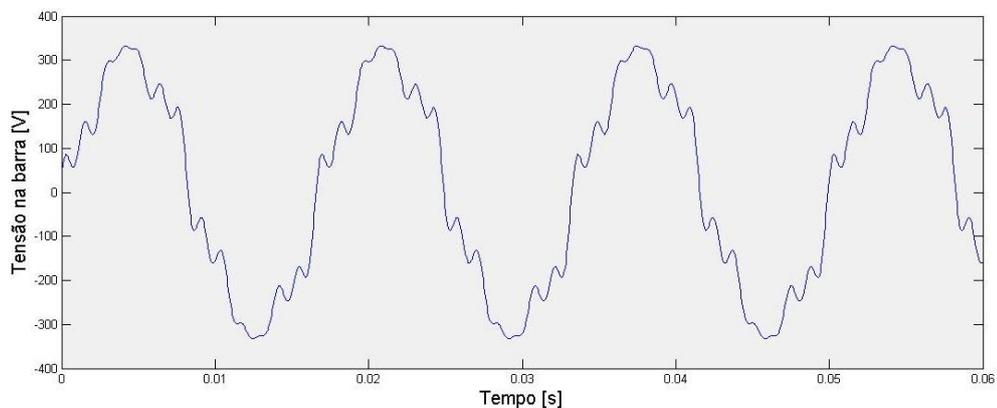


Figura 3-18 – forma de onda de tensão na barra com alimentação do grupo gerador – com filtro 1.

Fonte: própria.

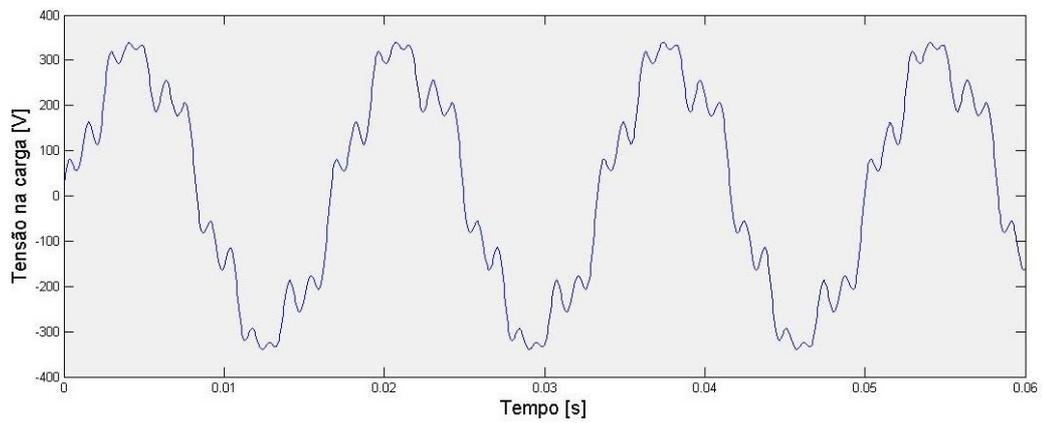


Figura 3-19 – forma de onda de tensão na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 1.

Fonte: própria.

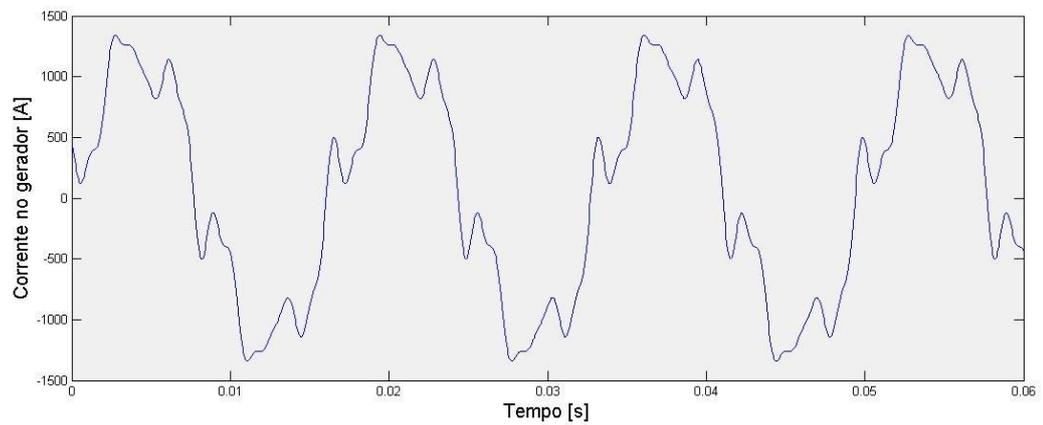


Figura 3-20 – forma de onda de corrente no grupo gerador – com filtro 1.

Fonte: própria.

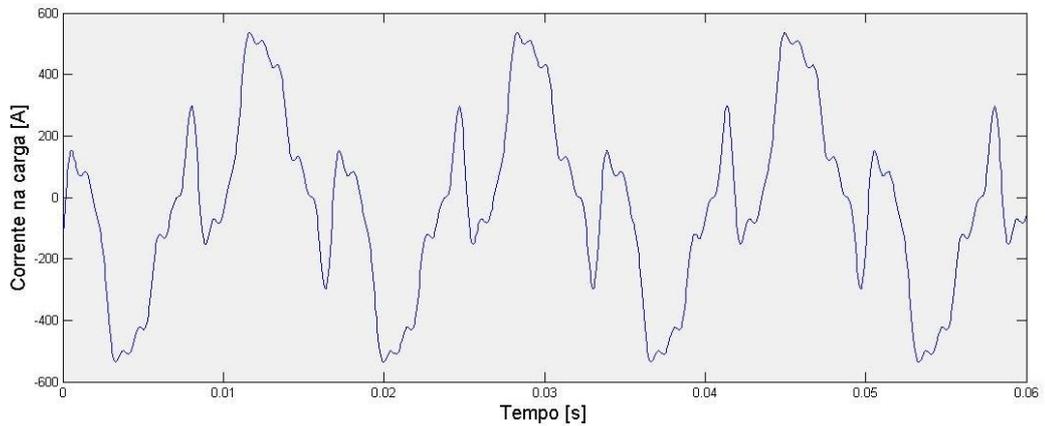


Figura 3-21 – forma de onda de corrente na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 1.

Fonte: própria.

Os valores de distorções harmônicas de tensão obtidos com as mitigações seguem na tabela 3-11.

Tabela 3-11 – análise do THD de tensão com filtro.

| Ordem Harmônica | GRUPO GERADOR COM FILTRO | | | |
|-----------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------|
| | THD (V) | | | THD (I) |
| | Barra (13,8kV) | Gerador | Carga | Primário Transf. 1 |
| 3 | -- | -- | 3,0% | -- |
| 5 | 11,6% | 8,7% | 11,6% | 24,1% |
| 7 | 5,5% | 4,1% | 6,4% | 7,9% |
| 9 | -- | -- | 2,7% | -- |
| 11 | 7,5% | 5,7% | 8,7% | 6,9% |
| 13 | 7,8% | 5,8% | 9,0% | 6,0% |
| 15 | -- | -- | 2,7% | -- |
| TOTAL | 16,8% | 12,6% | 18,8% | 27,0% |

Fonte: própria.

É possível comparar os valores de corrente circulante do capacitor e o da tensão de operação com relação aos seus limites na tabela 3-12.

Tabela 3-12 – valores de tensão e corrente do filtro.

| | f (Hz) | Filtro (282 Hz) | | Filtro 7° (402 Hz) | |
|-------------|--------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|
| | | Tensão (V) | Corrente (A) | Tensão (V) | Corrente (A) |
| 1° | 60 | 232,70 | 33,69 | 227,35 | 32,91 |
| 3° | 180 | 9,87 | 2,04 | 8,28 | 3,60 |
| 5° | 300 | 117,61 | 85,13 | 62,96 | 45,57 |
| 7° | 420 | 11,17 | 11,32 | 61,47 | 62,29 |
| 9° | 540 | 1,98 | 1,23 | 6,91 | 9,00 |
| 11° | 660 | 4,27 | 6,80 | 11,13 | 17,72 |
| 13° | 780 | 2,97 | 5,58 | 7,09 | 13,34 |
| 15° | 900 | 0,60 | 0,62 | 1,50 | 3,27 |
| VALOR TOTAL | | 261,22 | 92,70 | 244,38 | 87,39 |

| | | | | |
|-----------------------|------|-------|------|-------|
| LIMITES ACEITÁVEIS | 242 | 42,66 | 242 | 42,66 |
| | 110% | 135% | 110% | 135% |

Fonte: própria.

Ambos os filtros não suportariam a corrente circulante, ultrapassando os valores admissíveis, acarretando em sobreaquecimento devido à sobrecorrente e danificando o dielétrico devido à sobretensão, mais explanados no capítulo 2.5.2.

Os valores admissíveis são citados pela IEEE Std 18-2002, os quais os fabricantes usam como referência para fabricação dos capacitores.

Com o intuito de melhorar a mitigação das distorções para valores mais próximos das recomendações citadas acima, foram recalculados os filtros com outras frequências de sintonia bem como o fator de qualidade.

3.3.3.2 Dimensionamento de filtros com novo fator de sintonia e fator de qualidade

Quanto mais próxima a frequência de sintonia do filtro está da frequência do harmônico circulante, menor será a impedância para essa frequência. Com isso maior será a mitigação das distorções.

Tomando como base a alteração dos parâmetros do filtro de quinto harmônico, obteve-se as respostas em frequência das impedâncias dos filtros representados pelos gráficos 3-22, para frequência de 282 Hz e fator de qualidade 5, e pelo gráfico 3-23 para a frequência de 290 Hz e fator de qualidade 50.

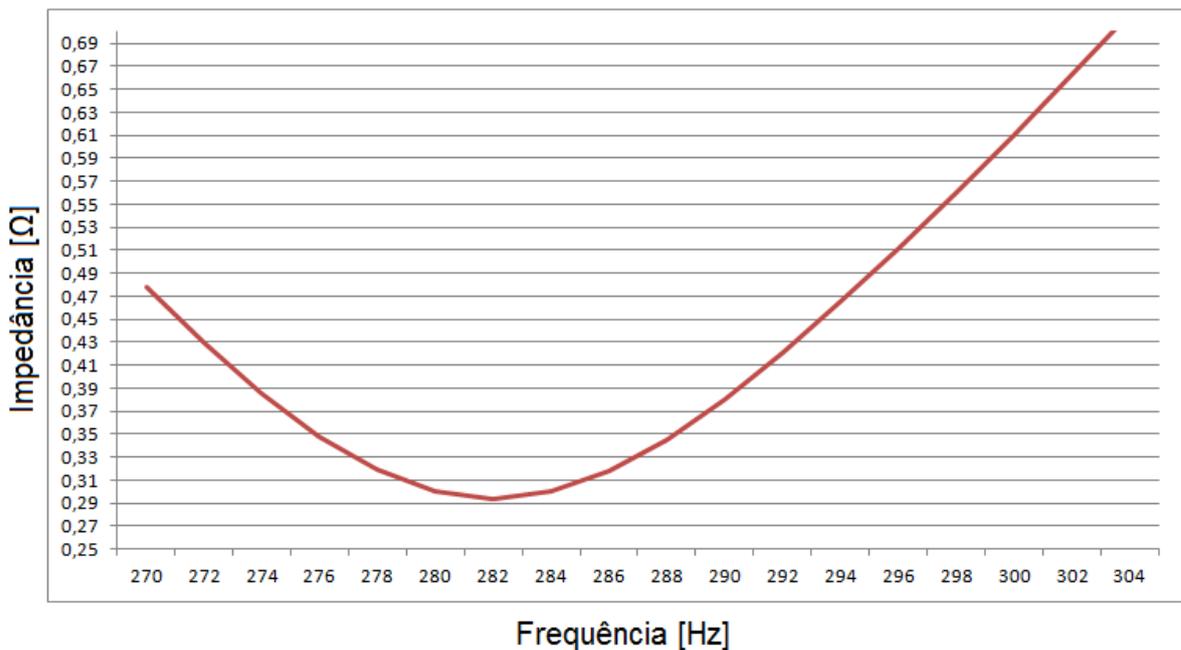


Figura 3-22 – resposta em frequência para filtro de quinto harmônico, 282 Hz e Q_c 5.

Fonte: própria.

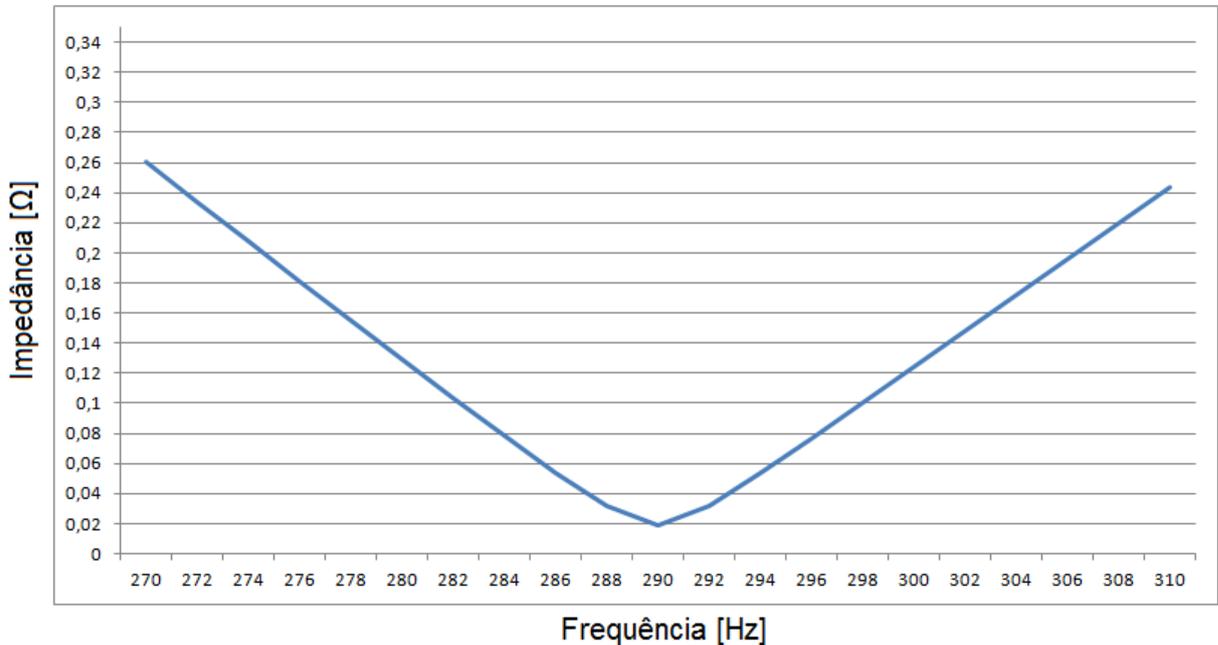


Figura 3-23 – resposta em frequência para filtro de quinto harmônico, 290 Hz e Q_c 30.

Fonte: própria.

Com essa variação analisada nos gráficos acima, utilizamos 290 Hz para o filtro de quinto harmônico e 410 Hz para o filtro de sétimo harmônico, ambos com valor de Q_c igual a 50.

Para que ocorresse esse melhor resultado em relação às distorções, a corrente e tensão eficaz no filtro terão valores mais elevados em relação aos valores obtidos na tabela 3-12. Portanto, foram utilizados valores comerciais de capacitores que operam em até 525 V nominais e que corrijam o FP para 1, para que suportem os altos valores de corrente e tensão.

Os parâmetros dos filtros seguem na tabela 3-13. Os passos utilizados nos cálculos foram os mesmos adotados nos filtros do capítulo 3.3.2.

Tabela 3-13 – valores de parâmetros dos filtros recalculados.

| | Xc (Ω) | C (Faraday) | C comercial (Faraday) | L (mH) | | R (m Ω) | |
|---------|-----------------|-------------|-----------------------|------------|------------|-----------------|------------|
| | | | | 5 (290 Hz) | 7 (410 Hz) | 5 (290 Hz) | 7 (410 Hz) |
| CARGA 1 | 0,952795 | 0,000578 | 0,000576 | 0,000523 | 0,000262 | 0,019056 | 0,013479 |
| CARGA 2 | 0,952795 | 0,000578 | 0,000576 | 0,000523 | 0,000262 | 0,019056 | 0,013479 |
| CARGA 3 | 1,563562 | 0,000347 | 0,000351 | 0,000858 | 0,000429 | 0,031271 | 0,022119 |
| CARGA 4 | 2,152197 | 0,000260 | 0,000255 | 0,001181 | 0,000591 | 0,043044 | 0,030446 |
| CARGA 5 | 3,136058 | 0,000173 | 0,000175 | 0,001721 | 0,000861 | 0,062721 | 0,044364 |
| CARGA 6 | 3,136058 | 0,000173 | 0,000175 | 0,001721 | 0,000861 | 0,062721 | 0,044364 |

Fonte: própria.

3.3.3.3 Resultados da inserção dos filtros recalculados

Após a inserção dos novos filtros no sistema, obtivemos as seguintes formas de onda e valores de THD e DIT de tensão e corrente.

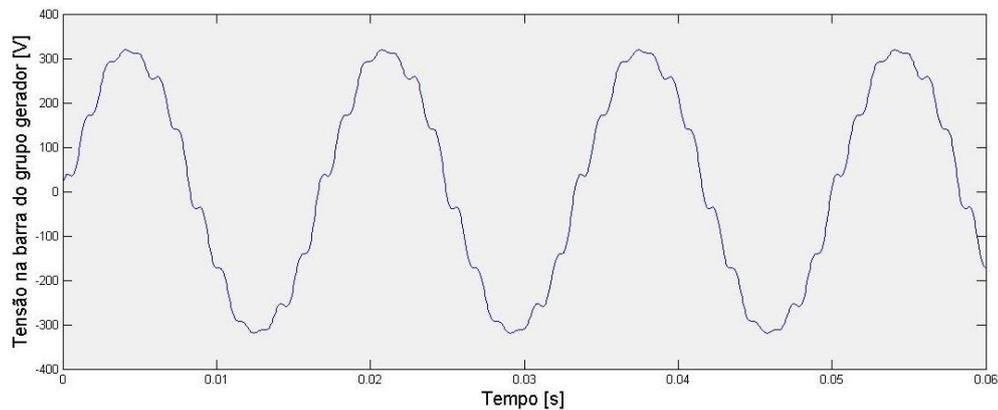


Figura 3-24 – forma de onda de tensão no grupo gerador – com filtro 2.

Fonte: própria.

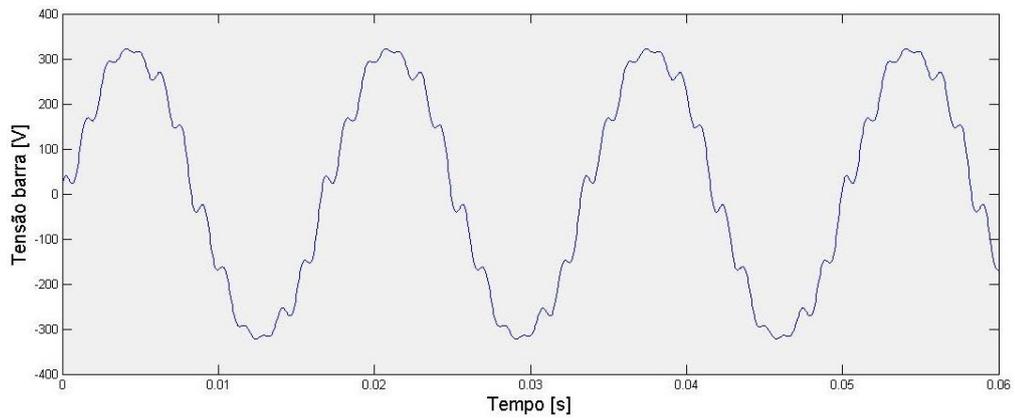


Figura 3-25 – forma de onda de tensão na barra com alimentação do grupo gerador – com filtro 2.

Fonte: própria.

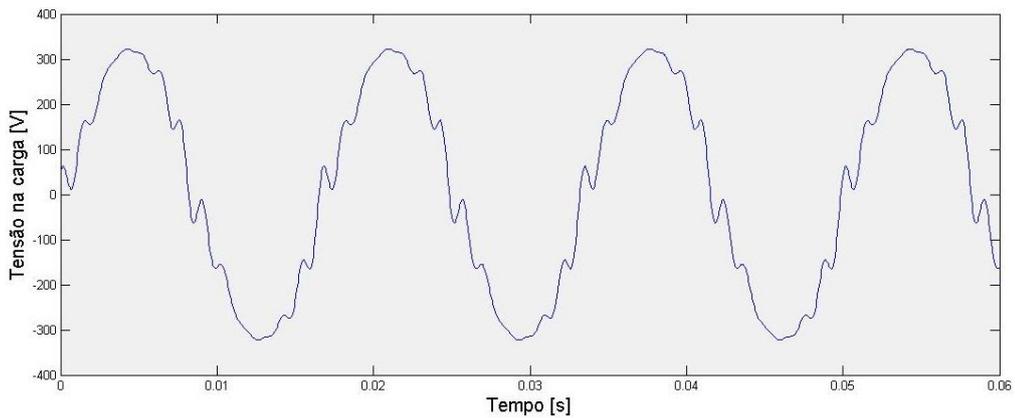


Figura 3-26 – forma de onda de tensão na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 2.

Fonte: própria.

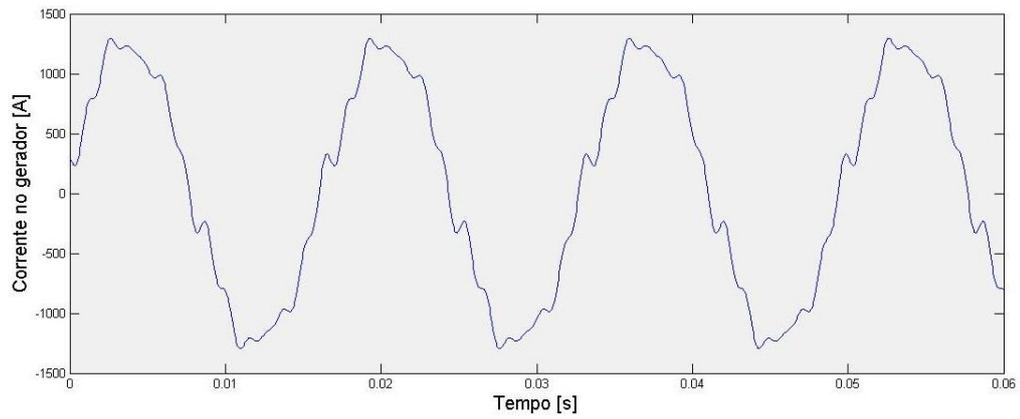


Figura 3-27 – forma de onda de corrente no grupo gerador – com filtro 2.

Fonte: própria.

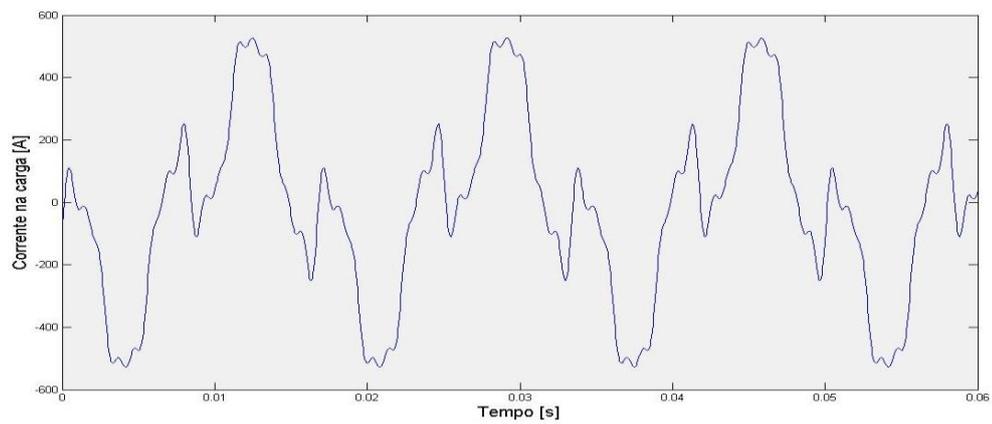


Figura 3-28 – forma de onda de corrente na carga com alimentação do grupo gerador – com filtro 2.

Fonte: própria.

Tabela 3-14 – análise das distorções harmônicas com filtros recalculados.

| GRUPO GERADOR COM FILTRO | | | | | |
|--------------------------|----------------|---------|--------|---------------------|--------------------|
| DIT (V) | | | | | DIT (I) |
| Ordem Harmônica | Barra (13,8kV) | Gerador | Carga | Recomendações ANEEL | Primário Transf. 1 |
| 3 | -- | -- | 3,03% | 6,50% | -- |
| 5 | 3,46% | 2,56% | 3,88% | 7,50% | 6,59% |
| 7 | 1,16% | 0,85% | 1,29% | 6,50% | 1,54% |
| 9 | -- | -- | 2,26% | 2,00% | -- |
| 11 | 5,95% | 4,38% | 6,67% | 4,50% | 5,22% |
| 13 | 6,35% | 4,68% | 7,12% | 4,00% | 4,72% |
| 15 | -- | -- | 2,49% | 1,00% | -- |
| THD | 9,22% | 6,96% | 11,51% | 10,00% | 9,76% |

Fonte: própria.

Podemos observar que os valores de THD de tensão reduziram para valores próximos à recomendação da ANEEL.

Os valores de corrente e tensão admissíveis pelo capacitor utilizado nos filtros não excederam os admissíveis especificados citados no capítulo 2.5.2. Segue tabela 3-15 com tais valores.

Tabela 3-15 – valores de tensão e corrente dos filtros recalculados.

| | f (Hz) | Filtro 5° (290 Hz) | | Filtro 7° (410Hz) | |
|-------------|--------|--------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | | Tensão (V) | Corrente (A) | Tensão (V) | Corrente (A) |
| 1° | 60 | 236,19 | 51,29 | 231,06 | 50,17 |
| 3° | 180 | 11,16 | 7,27 | 8,50 | 5,54 |
| 5° | 300 | 119,97 | 130,26 | 18,88 | 20,49 |
| 7° | 420 | 2,66 | 4,05 | 54,71 | 83,16 |
| 9° | 540 | 2,07 | 4,04 | 6,94 | 13,57 |
| 11° | 660 | 3,61 | 8,62 | 9,48 | 22,63 |
| 13° | 780 | 2,58 | 7,29 | 6,15 | 17,36 |
| 15° | 900 | 0,65 | 2,12 | 1,47 | 4,80 |
| VALOR TOTAL | | 265,21 | 140,77 | 238,72 | 104,42 |

| | | | | |
|-----------------------|-------|--------|-------|--------|
| LIMITES ACEITÁVEIS | 577,5 | 154,47 | 577,5 | 154,47 |
| | 110% | 135% | 110% | 135% |

Fonte: própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1.1 Fluxo harmônico na planta

Com o trabalho realizado, foi possível verificar que as contribuições harmônicas proveniente das cargas não lineares instaladas, distorcem as formas de onda de corrente e tensão a valores maiores das recomendáveis pela ANEEL. Isto se deve à quantidade e ao perfil de espectro harmônico das cargas.

Percebeu-se que o caminho preferível das correntes é pela impedância da concessionária, devida ao seu baixo valor de impedância em relação ao sistema. Devido ao baixo valor de impedância da concessionária, a distorção harmônica na barra principal é baixa, forma de onda próxima de uma senoide, conforme a figura 3-8. O mesmo efeito não pode ser observado quando a planta é alimentada pelo grupo gerador. Tendo que a impedância do gerador é mais de 50 vezes o valor da impedância da concessionária, há uma alta distorção harmônica de tensão, visível na figura 3-11 e na tabela 3-5.

Um fator que impede o fluxo harmônico total das cargas, para a barra principal, é a ligação em delta-estrela dos transformadores, pois os harmônicos de sequência zero, geradas por cargas não lineares monofásicas, circulam pelo terra do lado estrela aterrada do transformador, e assim não flui para a barra de alta tensão.

As reatâncias dos filtros harmônicos em paralelo com a reatância do sistema propiciam um valor de ressonância diferente do valor para quais foram sintonizados. Porém, com os valores obtidos nas simulações, observamos que esses valores de frequência de ressonância não coincidem com as frequências harmônicas circulantes na planta. Caso contrário, seria possível visualizar elevados valores de corrente proveniente da ressonância paralela, semelhantes à explanada no capítulo 3.3.

Esses valores elevados de distorção afetam o desempenho das máquinas e equipamentos, assim como o grupo gerador, que sofre aquecimento e possíveis problemas com a regulação de tensão como debatido no capítulo 2.

Contudo, analisando a tabela 3-5 e as formas de onda, os primeiros filtros dimensionados de 5^o e 7^o harmônico reduziram em mais da metade o THD de

tensão e de corrente da planta. Porém, não foram tão eficazes na mitigação quanto o esperado, pois os valores de THD e DIT continuaram superiores às recomendações.

Com isso foi necessário redimensionar os filtros para reduzir o fluxo harmônico circulante das cargas para o gerador. Os resultados dos novos filtros foram satisfatórios dentro das recomendações.

4.1.2 Análise dos filtros passivos sintonizados

Como citado acima, a contribuição harmônica da planta é muito elevada. Logo, os filtros passivos deverão suportar elevados valores de corrente para reduzir o conteúdo harmônico a valores admissíveis. Para tal efeito foi necessário aumentar a potência reativa do filtro e sobredimensionar a tensão nominal do capacitor a um valor acima da tensão do sistema, para que o dielétrico suporte sobretensão e sobrecorrente elevada. Porém, quanto maior a potência fornecida pelo filtro e maior a classe de isolamento do capacitor, aumenta o custo agregado a ele.

A ferramenta de simulação, *Simpower* do *MatLab*, nos possibilitou a realização de simulações mudando os parâmetros dos filtros. Assim foram analisados os resultados, chegando a valores adequados de fator de dessintonia e qualidade dos filtros para que reduzissem as distorções harmônicas a níveis menores. Também se atentando aos valores de tensão e corrente suportáveis pelo capacitor.

4.1.3 Análise dos grupos geradores

Como debatido no capítulo 2.5.1, a distorção de corrente e tensão na barra dos grupos geradores podem causar leituras a níveis errados, dependendo do sistema de leitura do controle do grupo gerador, e assim desestabilizando sua

velocidade de rotação. Isso ocorre quando há uma maior frequência em que a tensão obtém valor zero, comparado com uma senoide pura.

A alta distorção de corrente aumenta as perdas por aquecimento nos condutores, possibilitando o desligamento do grupo pela sua proteção de sobretemperatura e afetando sua vida útil.

Com adição dos filtros passivos sintonizados, houve um decréscimo de corrente que circula pela impedância do gerador, desviando boa parte da corrente harmônica para os filtros. Portanto, a adição de filtros harmônicos na planta propicia um melhor desempenho do grupo gerador, em relação à rede com harmônicos, não afetando sua vida útil por aquecimento.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. E. José, **Dissertação de Mestrado – Utilização de Lâmpadas Fluorescentes Compactas (LFCs) Associadas a Outras Cargas Não Lineares – seus Impactos em um Sistema de Distribuição**. Itajubá 2004.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**. Resolução Normativa N° 444 de 6 de setembro de 2011. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisão_3.pdf. Acessado em outubro de 2011.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica**, Brasília-DF, 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>, Curitiba, Acessado em: Abril de 2011.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Resolução Normativa N° 414 de 9 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acessado em: Abril de 2011.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. **Power System Harmonics**. Chichester: Jhon Wiley & Sons, 2003.

BRITO, C.; LEÃO, R. Desempenho de um motor de indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação, **Universidade Federal do Ceará**, dez. 2006.

CATERPILLAR, **Generator Systems**. Application and Installation, Caterpillar, 2008.

CHAIRMAN, Wagner V. E., **Effects of Harmonics on Equipment**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993.

COPEL, **Taxas e Tarifas**, Curitiba, 2008. Disponível em : <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Facopel%2F>

pagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F5BAFDCF77F92F5A5032573EC006C3074,

Curitiba, Acessado em: Abril de 2011.

COPEL, **Manual Grande Cliente**, Curitiba, 2007.

CPFL, **Atendimento a Cargas Geradoras de Harmônicos em Sistemas Primários de Distribuição**, São Paulo, 2002.

DIAS, Guilherme A.D., **Harmônicos em Sistemas Industriais**. Porto Alegre, 2ª Edição, EDIPUCRS, 2002.

ELETROBRÁS. **Manual de Tarifação de Energia Elétrica**. 2. Ed. Brasília, 2002.

GERIN, Merlin, **Qualidade de Energia Harmônica**, São Paulo, 2003. Apostila técnica, Schneider. Disponível em: <http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf#page=1>, Curitiba, Acessado em: Outubro de 2010.

IEEE std 18-2002. **Shunt Power Capacitors**. New York, USA, 2002.

IEEE std 1531-2003. **IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**. New York, USA, 2003.

IEEE std 519-1992. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. New York, USA, 1993.

KIMBARK, E. W., **Direct Current Transmission**, Vol I, John Wiley & Sons, Inc., 1971.

KUMAR, Suresh, **Non-linear Loads and Their Interactions with the Diesel Generators Units**, India, 2004. Artigo. National Institute of Technology Calicut. Disponível em: <http://sureshks.netfirms.com/article/upsgen/upsgen.htm#56>, Curitiba, acessado em: Maio de 2011.

LEÃO, Paulo Cesar Abreu. **Desempenho de Conversores de Frequência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Momentâneos de Tensão**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.

PIRES, Igor Amariz; **Caracterização de Aparelhos Eletrodomésticos**. O Setor elétrico. São Paulo, ed.52, p. 38-45, maio. 2010.

PROCOBRE. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Instituto Brasileiro do Cobre, São Paulo, Nov. 2001.

POMILIO, José Antenor. **Fontes Chaveadas**. Apostila Didática. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>. Acessado em: Outubro de 2010.

ROCHA, J. E. SANCHEZ, W. D. C. **Arquiteturas Elétricas Adotadas nos Aerogeradores – Discussões sobre harmônicos**. Artigo. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/III%20SBSE%20-%202010/PDF/SBSE2010-0013.PDF>, Curitiba, Acessado em: Setembro de 2011.

SCHWEITZER, **Como medir as componentes simétricas de um sistema elétrico trifásico**. Apostila técnica, SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, COMERCIAL LTDA.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das Distorções Harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial**. Minas Gerais: UFMG, 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

WILLIAMS, Gregory M. **Understanding Nonlinear Loads and Generator set Interaction**. Artigo. Caterpillar Inc.