



UNIFACS
UNIVERSIDADE SALVADOR
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

**UNIFACS UNIVERSIDADE SALVADOR
MESTRADO EM INDÚSTRIA DA ENERGIA E REGULAÇÃO**

CLOVIS ANDRADE DE ALMEIDA

**DISTORÇÃO HARMÔNICA: ESTUDO DE CASO DE UMA
CENTRAL TELEFÔNICA**

Salvador
2014

CLOVIS ANDRADE DE ALMEIDA

**DISTORÇÃO HARMÔNICA: ESTUDO DE CASO DE UMA
CENTRAL TELEFÔNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Energia da UNIFACS Universidade Salvador, como parte das exigências do curso de Mestrado Profissional em Energia, para a obtenção de título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa

Salvador
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

(Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Universidade Salvador - UNIFACS)

Almeida, Clovis Andrade de

Distorção harmônica: estudo de caso de uma central telefônica./ Clovis Andrade de Almeida. – Salvador, 2014.

103 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Salvador – UNIFACS. Mestrado em Regulação da Indústria de Energia, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Barbosa.

1. Energia - geração própria. 2. Central telefônica. 3. Cargas não lineares. 4. Filtros trifásicos. I. Barbosa, Daniel, orient. II. Título.

CDD: 621.3

CLOVIS ANDRADE DE ALMEIDA

DISTORÇÃO HARMÔNICA: ESTUDO DE CASO DE UMA CENTRAL TELEFÔNICA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Regulação da Indústria de Energia, UNIFACS - Universidade Salvador, pela seguinte banca examinadora:

Daniel Barbosa – Orientador _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP
UNIFACS Universidade Salvador

Kleber Freire _____
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP
UNIFACS Universidade Salvador

Renato José Pino de Araújo _____
Doutorado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI/USP
CONSULTE Consultoria, Estudos e Participações Ltda

Salvador, de de 2014.

Dedico esta dissertação à minha mãe Analita pelo apoio e pelo carinho e aos meus filhos Rodrigo e Rafael pelo incentivo e pela fonte de motivação.

AGRADECIMENTOS

Cumpre-me expressar toda a gratidão às diversas pessoas que me apoiaram, de forma direta ou indireta, na realização deste trabalho.

Ao Supremo Criador, pelo sopro da vida que me permitiu admirar a natureza e todas as suas maravilhas.

À UNIFACS, pela base de apoio que proporcionou para realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio proporcionado ao longo das pesquisas bibliográficas e de campo.

Ao Professor Doutor Daniel Barbosa, pelo rigor e pela precisão como orientador, além do acompanhamento nas medições de campo.

Ao Professor Doutor Kleber Freire, pela compreensão e inúmeras sugestões apresentadas na condição de coorientador.

A Fátima Machado, pelo apoio e compreensão constantes aos alunos do Mestrado.

Ao meu filho Rodrigo, pelas diversas sugestões na redação e formatação deste trabalho.

À Professora Eneyle Freitas, pela revisão linguística.

Ao Professor Luiz Sérgio da Rocha Cavalcanti, na revisão de diversos tópicos.

Ao Engenheiro Ronaldo Menezes e à Professora Antônia Cruz, pelo apoio nos trabalhos de pesquisa de campo.

A Aline de Carvalho Luther, pela amizade, carinho e correções das ilustrações.

A Eliene de Carvalho, inseparável companheira, pela demonstração de carinho e compreensão nas horas de sacrifício do seu próprio lazer.

*As flores que encontramos pelo caminho
nos servem de alento.
Mas as pedras que dificultam nossa
caminhada, nos servem de ensinamento.*

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a distorção harmônica que ocorre em uma Central Telefônica, sobre o sistema de geração própria, causado por cargas não lineares, particularmente o conversor CA-CA. Foram considerados como aspectos relevantes para a escolha do tema a preocupação das concessionárias de energia e dos consumidores com a qualidade do fornecimento. No que tange a um sistema telefônico, adicionalmente às perdas conhecidas por efeito Joule torna-se importante o controle das distorções associadas a eventuais interferências eletromagnéticas. Dentro do contexto teórico, são apresentados resumos de estudos já realizados sobre as distorções harmônicas, alguns dos quais com propostas de soluções. Não obstante, não foram encontrados estudos sobre componentes harmônicos das correntes em sistemas de geração própria de centrais telefônicas, razão pela qual surgiu a motivação para a realização da análise da distorção e as possíveis consequências nos equipamentos eletrônicos de uma empresa telefônica de grande porte. São mostrados os resultados de pesquisas de campo com estudo comparativo entre o conteúdo harmônico associado à rede da concessionária de energia e o associado ao sistema de geração própria. Finalmente, são apresentadas propostas não somente para aprofundamento das pesquisas como também para reduzir o impacto de aumento das distorções pelo esperado aumento da quantidade de cargas não lineares, as quais incluem a inserção de filtros passivos trifásicos que se mostraram viáveis conforme simulações feitas com MATLAB.

Palavras-chave: Central telefônica. Geração própria. Cargas não lineares. Filtros trifásicos.

ABSTRACT

This work presents a study on the harmonic distortion that occurs in a telephone system on the self-generation system, caused by non-linear loads, particularly the AC-AC converter. The concern of utilities and consumers with the quality of power supply were considered to be relevant to the choice of theme. With respect to a telephone system and in addition to losses known as Joule effect, it becomes important to control the distortions associated with any electromagnetic interference. Within the theoretical context, study summaries already made on the harmonic distortions, some with proposed solutions are presented. However, there are no studies on harmonic components of current in self-generation of telephone exchanges systems. That is the reason of the motivation to carry out the analysis of distortion and its possible consequences on the equipments of a large telephone company. Results of the field research are shown with a comparative study of the harmonic content associated with the power utility and the associated self-generation system. Finally, proposals are made not only to deepen the research but also to reduce the impact of increased distortions by the expected increase in the amount of non-linear loads, which include the implementation of three-phase passive filters that were viable as simulations with MATLAB.

Keywords: Electric system. Internal power plant. Harmonic distortion. Non-linear loads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - forma de onda de tensão original (PENGHUI <i>et al.</i> , 2010).	25
Figura 2 - Densidade espectral da forma de onda de tensão original (PENGHUI <i>et al.</i> , 2010).	25
Figura 3 - Função periódica não senoidal	29
Figura 4 - Curva da corrente em uma carga linear.....	30
Figura 5 - Curva da corrente em uma carga não linear.....	30
Figura 6 - Comparação entre curvas de correntes em cargas lineares e em não lineares.....	31
Figura 7 - Diagrama unifilar equivalente das correntes harmônicas.....	32
Figura 8 - Curvas representativas da fundamental, da 5ª. Harmônica e da resultante.	
Figura 9 - Tetraedro de potência	35
Figura 10 - Comunicação simples.....	38
Figura 11 - Comunicação com topologia <i>ponto-multiponto</i>	39
Figura 12 - Comunicação com topologia <i>multiponto</i>	39
Figura 13 - Comunicação com ponto central.....	40
Figura 14 - Comunicação entre usuários conectados a centrais diferentes	40
Figura 15 - Comunicação de longa distância entre dois usuários	41
Figura 16 - Diagrama de interligação entre Terminal e Repetidora (BARRADAS; SILVA, 1980).....	48
Figura 17 - Sistema de Geração Própria (BARRADAS; SILVA, 1980).....	49
Figura 18 - Geração própria em corrente alternada (BARRADAS; SILVA, 1980)	49
Figura 19 - Geração própria em corrente alternada (BARRADAS; SILVA, 1980)	51
Figura 20 - Diagrama básico de um conversor CC-CA trifásico.....	52
Figura 21 - Sequência das etapas das medições em campo.....	55
Figura 22 - Topologia do sistema de energia para as cargas essenciais.....	56

Figura 23 - Frequencímetro da USCA.....	59
Figura 24 - Forma de onda da tensão da rede da concessionária, sem carga, com pequena distorção harmônica	60
Figura 25 - Forma de onda da tensão da rede da concessionária com carga	61
Figura 26 - Forma de onda da tensão do GMG operando sem carga.....	61
Figura 27 - Forma de onda da tensão do GMG com carga.....	62
Figura 28 - Analisador trifásico de qualidade da energia elétrica.....	64
Figura 29 - Conexões das sondas de corrente na forma de alicate amperímetro	65
Figura 30 - Conexões das sondas de tensão na forma de garra jacaré.....	66
Figura 31 - Diagrama de tensão da fase A do QDCA alimentado pela rede da concessionária	68
Figura 32 - Diagrama de tensão da fase B do QDCA alimentado pela rede da concessionária	68
Figura 33 - Diagrama de tensão da fase C do QDCA alimentado pela rede da concessionária	69
Figura 34 - Diagrama de tensão da fase A do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador.....	70
Figura 35 - Diagrama de tensão da fase B do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador.....	70
Figura 36 - Diagrama de tensão da fase C do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador.....	71
Figura 37 - Diagrama de corrente da fase A do QDCA alimentado pela concessionária	72
Figura 38 - Diagrama de corrente da fase B do QDCA alimentado pela concessionária	73
Figura 39 - Diagrama de corrente da fase C do QDCA alimentado pela concessionária	73
Figura 40 - Diagrama de corrente da fase A do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador.....	74

Figura 41 - Diagrama de corrente da fase B do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador.....	74
Figura 42 - Diagrama de corrente da fase C do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador.....	75
Figura 43 - Modelo do sistema para o GMG com o retificador.....	76
Figura 44 - Modelo do sistema para a fonte de tensão contínua com o inversor.....	77
Figura 45 - Modelo do sistema de geração própria.....	78
Figura 46 - Circuito equivalente de Norton.....	78
Figura 47 - Formas de onda obtidas na simulação com MATLAB.....	79
Figura 48 - Simulação alternativa com Simulink.....	81
Figura 49 - Formas de ondas de corrente e de tensão com a simulação alternativa em <i>Simulink</i>	82
Figura 50 - Fluxograma do procedimento operacional sugerido para acompanhamento das distorções.....	85
Figura 51 - Modelo para o GMG, com inserção do filtro.....	87
Figura 52 - Circuito equivalente dos filtros com impedância Z_f	89
Figura 53 - Topologia do modelo alternativo em Simulink, com inclusão dos filtros..	90
Figura 54 - Topologia do filtro passa faixa com sintonia simples.....	91
Figura 55 - Diagrama de Bode para o filtro passa faixa com sintonia simples.....	91
Figura 56 - Topologia do filtro passa faixa com sintonia dupla.....	92
Figura 57 - Diagrama de Bode da resposta em frequência para o filtro passa faixa com sintonia dupla.....	93
Figura 58 - Topologia do filtro passa altas.....	93
Figura 59 - Diagrama de Bode para o filtro passa altas.....	94
Figura 60 - Topologia do filtro passa altas tipo C.....	95
Figura 61 - Diagrama de Bode para o filtro passa altas tipo C.....	95
Figura 62 - Formas de ondas de corrente e de tensão obtidas com a simulação alternativa em Simulink, após a inserção dos filtros.....	96

Figura 63 - Curva da impedância resultante com o conjunto dos filtros inseridos.....97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do motor.....	57
Tabela 2 - Dados do gerador.....	58
Tabela 3 - Medidas realizadas com cargas essenciais alimentadas pela rede da concessionária e do grupo motor gerador.....	63
Tabela 4 - Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – DHIT (%).....	67
Tabela 5 - Quadro comparativo entre as distorções percentuais da fase B do GMG80	
Tabela 6 - Valores do capacitor e dos indutores do modelo.	87
Tabela 7 - Valores do capacitor e dos indutores do modelo dessintonizado.....	88

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC-DC	<i>Alternating Current – Direct Current</i> (Corrente Alternada – Corrente Contínua)
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
FIE	Fontes Ininterruptas de Energia
GMG	Grupo Motor Gerador
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Internacional de Eletrotécnica)
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar com Porta Isolada)
LC	Indutor – Capacitor
NBR	Norma Brasileira
PGMQ	Plano Geral de Metas de Qualidade
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
QDCA	Quadro de Distribuição de Corrente Alternada
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QGDE	Quadro Geral de Distribuição Essencial

SCM	Sistema de Comunicações Móveis
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STFC	Serviço Telefônico Fixo Comutado
TX-RX	Transmissor/Receptor ou Transceptor
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UPQI	<i>Unified Power Quality Index</i> (Índice de Qualidade de Energia Unificado)
USCA	Unidade de Supervisão de Corrente Alternada
USCC	Unidade de Supervisão de Corrente Contínua
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variação de Tensão de Longa Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA	22
2.2	OS EFEITOS E O MONITORAMENTO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	24
2.3	A ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E A PRESENÇA DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	26
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
3.1	PRINCÍPIOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA	28
3.1.1	Principais grandezas associadas à distorção harmônica.....	32
3.2	FUNDAMENTOS DE UM SISTEMA TELEFÔNICO	38
3.2.1	Cargas sensíveis a componentes harmônicos em centrais telefônicas.....	46
3.2.2	Características do sistema de geração própria.....	47
3.2.3	Grupo motor gerador	50
3.2.4	Unidade de Supervisão de Corrente Alternada	50
3.2.5	Conversor CA-CA	51
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
4.1	CONFIGURAÇÃO DO TESTE.....	56
4.2	ANÁLISE QUALITATIVA	59
4.3	ANÁLISE QUANTITATIVA.....	64
4.4	ANÁLISE DAS TENSÕES	67
4.5	ANÁLISE DAS CORRENTES.....	72
4.6	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	76
4.6.1	Modelagem alternativa.....	79
4.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE RESULTADOS	83
5	MEDIDAS MITIGADORAS SUGERIDAS	84
5.1	PROPOSTAS DE AÇÕES MITIGADORAS PARA REDUZIR A DISTORÇÃO	85
5.1.1	Filtros passivos	85
5.1.1.1	Filtros sintonizados	86
5.1.1.2	Filtros dessintonizados.....	88
5.2	PROPOSTA ALTERNATIVA	88
6	CONCLUSÃO	98
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

A existência de distorções na forma de onda e de assimetrias nas tensões e nas correntes dos sistemas polifásicos é um assunto quase tão antigo quanto o próprio sistema elétrico de corrente alternada (DECKMANN; POMILIO, 2005; CRUZ; PESSANHA, 2013). Estas alterações surgem não somente com os dispositivos eletrônicos, mas também devido às curvas de saturação dos diversos equipamentos elétricos, como transformadores e motores. Desta forma, os fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) são inerentes à operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e afetam todos os tipos de consumidores com diversos tipos de efeito, como aquecimento, interrupção de fornecimento, dentre outros (BEATY *et al.*, 2012).

Diante da importância da QEE para o funcionamento do SEP, várias normas e resoluções sobre o tema foram criadas. Destacam-se, entre elas, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8 (ANEEL, 2012), que são tratados em caráter oficial pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Brasil, tanto em relação à qualidade do produto quanto à qualidade do serviço. Esta resolução define as metodologias de medição, os indicadores, o limite e os valores de referência, porém, apenas para concessionárias de fornecimento de energia elétrica (COLNAGO *et al.*, 2011).

Dentre os vários fenômenos de QEE, os componentes harmônicos se sobressaem, uma vez que estão presentes nos diversos níveis de tensão e podem causar não apenas impactos na alimentação de cargas sensíveis, mas também interferências eletromagnéticas em sistemas de comunicações (RASHID, 1999). Por estas razões, as empresas de telecomunicações são consumidores sensíveis ao suprimento de energia elétrica com baixos padrões de qualidade, principalmente devido aos harmônicos e às interrupções de fornecimento de energia. Assim, de modo a reduzir esses efeitos, as empresas telefônicas costumam implantar seus sistemas de reserva de geração própria, para o caso eventual de interrupção, visto que o serviço de telefonia é considerado de utilidade pública e é fiscalizado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) conforme o Plano Geral de Metas de Qualidade (PGMQ) (ANATEL, 2002).

Apesar de não se tratar de serviço público de fornecimento de energia, existe a preocupação por parte das concessionárias de energia elétrica no que diz respeito à grande quantidade de cargas não lineares geradoras de harmônicos nas centrais telefônicas e que se propagam pela rede e que vem aumentando de forma significativa. Tal preocupação se deve não somente à distorção harmônica como também à redução do fator de potência na interface com a concessionária (BHUVANESWARI *et al.*, 2011).

É factível salientar que, apesar da preocupação com consumidores sensíveis, poucos estudos que relacionam as centrais telefônicas e a QEE foram encontrados na literatura correlata, bem como sobre os problemas entre geração própria e QEE. Segundo Arioli *et al.* (2012), este fato se deve a esses sistemas atuarem na retaguarda, de forma imperceptível para aqueles que não se envolvem diretamente com esse tipo de geração.

Todavia, com o objetivo de aumentar a compreensão sobre a QEE e o funcionamento das centrais telefônicas, Caciotta *et al.* (2008) e Leccese (2007) realizaram medições de qualidade de energia em quatro centrais telefônicas de grande porte da cidade de Roma (Itália), e verificaram que os baixos índices de QEE podem afetar o serviço telefônico, principalmente devido às interrupções provocadas por sobretensões. É importante enfatizar que nenhum levantamento foi apresentado quanto aos harmônicos, limitando-se apenas aos efeitos das potências reativas, tanto capacitivas quanto indutivas. Além disso, não foi exposto qualquer comparativo entre a energia da concessionária e o sistema de geração própria da companhia telefônica pesquisada.

No contexto supracitado, este trabalho apresenta um estudo da distorção harmônica causada pela central telefônica ao sistema de geração própria, bem como uma análise dos efeitos sobre cargas sensíveis no ambiente da central e uma proposta de mitigação.

É importante destacar que a relevância deste trabalho está na escassez de estudos dos efeitos da QEE sobre o sistema de geração própria de centrais telefônicas, uma vez que a distorção harmônica irá se propagar pelos circuitos alimentados pelo Grupo Motor Gerador (GMG) dentro do próprio ambiente da central.

1.1 OBJETIVOS

As diversas ações realizadas ao longo do trabalho tiveram como objetivo geral a análise dos componentes harmônicos produzidos por um conversor CA–CA de uma central telefônica de grande porte, com ênfase nas correntes, com a apresentação de uma proposta de mitigação e aprofundamento das pesquisas.

Na primeira abordagem do problema, foram feitas medições com osciloscópio e com analisador de qualidade de energia em cada fase do barramento alimentado pela concessionária e do mesmo barramento alimentado pelo GMG. Em seguida, foram implementadas as análises qualitativa e quantitativa das medidas obtidas.

1.2 METODOLOGIA

Os trabalhos tiveram início com a escolha da central telefônica para a realização das medições, optando-se por uma de grande porte em razão das correntes elevadas fornecidas pelos conversores CA–CA. Em seguida, foram feitas medições com um osciloscópio para a análise qualitativa. Para a análise qualitativa, foi utilizado um analisador trifásico de qualidade de energia, com medições de tensão e de corrente. Os dados foram processados e tabulados com auxílio do aplicativo ANAWIN, com os correspondentes gráficos de tensões e de correntes em cada fase.

Em etapa subsequente, foram elaboradas simulações computacionais com o sistema de geração própria para representar os resultados obtidos no aplicativo MATLAB para posterior avaliação da viabilidade da utilização dos filtros.

Os trabalhos de pesquisa de campo e de simulações computacionais envolveram as seguintes etapas:

1.2.1 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa contemplou estudos de trabalhos de diversos autores de livros,

anais de congressos, periódicos, tanto em língua portuguesa quanto em idiomas estrangeiros, que pudessem contribuir de forma relevante para o tema.

1.2.2 Medições em campo

A metodologia para monitorar os terminais de saída do GMG envolveu duas fases: a primeira foi feita por um osciloscópio, enquanto que a segunda foi composta por um medidor de qualidade de energia elétrica. As medições foram feitas com o sistema em operação normal, de modo a proporcionar uma ideia exata do comportamento do sistema telefônico.

1.2.3 Análise dos resultados

A análise dos resultados foi feita com a tabulação dos resultados das medições e utilização do aplicativo Excel, com a elaboração de gráficos de valores percentuais das tensões e das correntes, com o barramento essencial alimentado pela concessionária e pelo GMG.

1.2.4 Simulações computacionais

Para melhor analisar as distorções harmônicas observadas na central telefônica, foram feitas simulações com a utilização do aplicativo MATLAB (MATHWORKS, 2011).

Inicialmente, foram consideradas cada subsistema isoladamente com o objetivo de verificar a influência de cada parte do sistema. Desta forma, o GMG foi simulado em conjunto com o retificador, e a fonte de tensão contínua com o inversor. Finalmente, as simulações foram concluídas com todos os subsistemas interligados e a inclusão dos filtros trifásicos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo-se a introdução e a conclusão.

A *Introdução* contempla a apresentação do problema, a justificativa da escolha do tema e os objetivos do trabalho, além da metodologia aplicada. A *Revisão bibliográfica* é apresentada no capítulo 2, com o intuito de apresentar os trabalhos até então escritos e que possuem relevância para o tema. O capítulo 3 apresenta a *Fundamentação teórica*, não apenas relacionada à distorção harmônica como no tocante aos principais aspectos operacionais de um sistema telefônico, com destaque para o sistema de geração própria. O capítulo 4 denomina-se *Análise dos resultados*, no qual são apresentados os resultados das medições feitas em campo e as simulações computacionais com o intuito de validar as pesquisas. As *Propostas* de mitigação e de aprofundamento dos estudos estão inseridas no capítulo 5, enquanto que no capítulo 6, denominado *Conclusão*, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os trabalhos de diversos engenheiros e pesquisadores de universidades e empresas concessionárias de energia e industriais. Muitos livros e artigos de congresso têm prestado relevante contribuição na tentativa de mostrar medidas capazes de mitigar os efeitos da distorção harmônica, incluindo-se as que são específicas de um sistema telefônico.

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA

O conceito de qualidade de energia envolve vários parâmetros e aspectos do sistema elétrico de potência, visto que os efeitos associados aos seus diversos fenômenos afetam diferentemente os vários consumidores. Desta forma, verifica-se que alguns tipos de eventos relacionados com a QEE podem ser mais prejudiciais a certos consumidores e menos a outros. É factível salientar que independentemente dos efeitos provenientes dos problemas de QEE, os equipamentos elétricos dos usuários devem operar com as grandezas elétricas dentro de limites que não prejudiquem seu funcionamento (GALHARDO; PINHO, 2005).

Os aspectos supramencionados fazem com que haja uma preocupação cada vez maior com a QEE, que apesar de antiga, somente a partir de 1995 ficou maior, em razão das privatizações do setor elétrico (BOLLEN; GU, 2006).

Existem quatro grandes razões para a crescente preocupação com a qualidade da energia elétrica (BEATY *et al.* (2012):

- Equipamentos de última geração baseados em microprocessadores e eletrônica de potência, mais sensíveis às degradações da qualidade da energia elétrica, incluindo-se as variações de tensão de curta duração (VTCD).
- A ênfase que se dá à eficiência energética faz surgir dispositivos que geram componentes harmônicos de forma crescente.
- Os usuários modernos têm mais acesso à informação, o que os torna

mais exigentes em relação à qualidade da energia elétrica.

- Crescente utilização de dispositivos conectados em rede, tal que a falha em um dos equipamentos pode implicar consequências maiores.

Em face aos fatores supracitados, nos quais são explicitadas inquietações sobre os problemas de QEE, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) observa os seguintes aspectos da qualidade do produto:

- a. Tensão em regime permanente;
- b. Fator de potência;
- c. Harmônicos;
- d. Desequilíbrio;
- e. Flutuação de tensão;
- f. Variações de tensão de curta duração (VTCD) e
- g. Variação de frequência.

A qualidade de energia afeta não somente os consumidores das concessionárias, mas também aos consumidores, cujos custos podem ser onerados devido à baixa QEE. Da parte das concessionárias, diversos estudos vêm sendo realizados para garantir melhor serviço aos consumidores, uma vez que a crescente preocupação com a qualidade da energia elétrica é causada pela utilização de equipamentos microprocessados, componentes aplicados para melhoria da eficiência energética, usuários melhor informados e grande quantidade de equipamentos conectados em rede (KUSKO; TOMPSN, 2007; PEDRAZA *et al.*, 2013).

São várias as definições para qualidade de energia, conforme o ponto de vista de cada agente do setor elétrico. Para a concessionária, pode representar o percentual do tempo em que o serviço estiver disponível, enquanto que para o fabricante de equipamentos, pode representar as características da fonte que possam assegurar que funcionem adequadamente. Não obstante, é senso comum

que a qualidade deva ser definida do ponto de vista do usuário, qual seja: “Qualquer anomalia apresentada na tensão, na corrente ou na frequência que resulte em falha ou mau funcionamento do equipamento do usuário” (ANEEL, 2011).

Deve-se destacar a definição proposta pela publicação do IEEE Std 1159 (1995): “Qualidade de energia refere-se a uma grande variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente em dado instante e em um dado ponto do sistema de potência”.

Dentro destes conceitos apresentados, o perfil atual de competitividade do mercado faz com que a qualidade seja um fator importante na concorrência (NOUROLLAH; MOALLEM, 2011). Todavia, avaliar a QEE de um sistema é uma tarefa difícil, visto que existe uma grande diversidade de padrões envolvidos. Desta forma, os autores propõem um índice denominado Índice de Qualidade de Energia Unificado (*Unified Power Quality Index – UPQI*), com base em parâmetros relacionados a fenômenos contínuos e fenômenos discretos, os quais são monitorados durante cerca de um ano com posterior avaliação.

2.2 OS EFEITOS E O MONITORAMENTO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Os efeitos produzidos pela distorção harmônica variam conforme o grau de sensibilidade de cada carga e se tornam um fator importante na avaliação da qualidade de energia, pois os componentes circulam pela rede. Entre os equipamentos que apresentam grande quantidade de cargas não lineares e, também, sensibilidade à qualidade de energia, situam-se os de telecomunicações, podendo, por isto, apresentar desempenho insatisfatório (CHUNG, 2003).

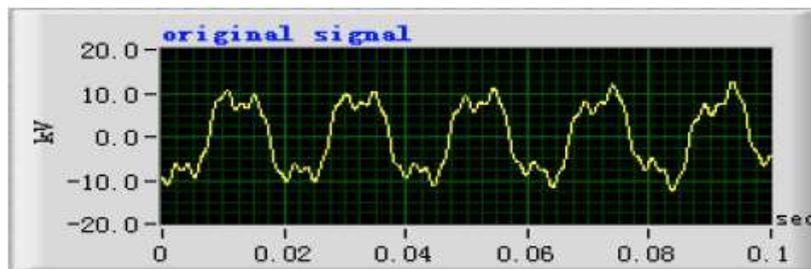
Os harmônicos que circulam na rede podem causar perturbações, tais como sobrecarga na rede de distribuição, vibrações e envelhecimento dos alternadores, dos transformadores e dos motores, ruídos dos transformadores, disparo antecipado de dispositivos de proteção, além de interferência eletromagnética em equipamentos de telecomunicações e em linhas telefônicas (FUCHS; MASOUM, 2008).

Diante dos inconvenientes existentes mencionados anteriormente, pode-se perceber que vem crescendo de forma inegável a importância do monitoramento da

qualidade de energia, e seus objetivos principais são destacados por Broshi (2008), a saber: registro de dados estatísticos para tomada de decisões, contratos específicos para consumidores com cargas mais sensíveis à qualidade, detecção de falhas e de potenciais problemas na rede. A norma IEC 61000-4-30 (2008) fornece métodos e fórmulas de medição e respectivas precisões.

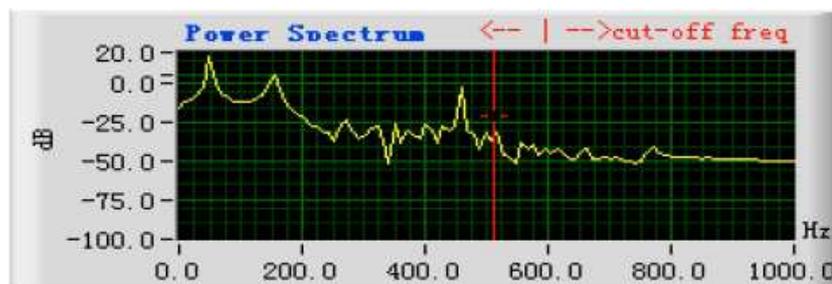
Os medidores de qualidade de energia mais modernos utilizam análise espectral quando se trata de monitorar o conteúdo harmônico. Penghui *et al.* (2010) apresentam proposta de monitoramento do conteúdo harmônico em transformadores com base em análise espectral, obtida a partir da análise temporal utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT). Na Figura 1 é mostrada a onda no domínio do tempo obtida em um transformador de subestação, na qual se percebe que a forma não corresponde a uma senóide normal, o que caracteriza a presença de componentes harmônicos.

Figura 1 - forma de onda de tensão original (PENGHUI *et al.*, 2010).



Na Figura 2 é mostrada a respectiva análise espectral, na qual se observam a frequência fundamental em 50 Hz e fortes presenças dos harmônicos de terceira, quinta, sétima e nona ordens. A frequência de 50 Hz é o padrão adotado na China, onde os testes foram realizados por PENGHUI *et al.* (2010).

Figura 2 - Densidade espectral da forma de onda de tensão original (PENGHUI *et al.*, 2010).



2.3 A ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E A PRESENÇA DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Muitos estabelecimentos comerciais, tais como centros empresariais e de compras, hospitais e centros de roteamento de chamadas telefônicas e de comunicações de dados utilizam, de forma crescente, dispositivos que representam pequenas cargas operando com boa eficiência energética, porém com geração de alto índice de distorção harmônica. Na área industrial, as cargas não lineares, cada vez mais, representam parcela significativa do total de cargas instaladas. Tanto nas cargas comerciais como nas industriais a eletrônica de potência se faz presente (BEATY *et al.*, 2012).

Wilson (1992) definiu o objetivo da eletrônica de potência como sendo controlar o fluxo de energia entre uma fonte e uma carga com grande eficiência, alta confiabilidade, pequenas dimensões, pouco peso e baixo custo. Esta definição baseia-se em parâmetros desejáveis, nem sempre possíveis de se obter. A definição de Dittmann (1993?) está baseada nos aspectos tecnológicos associados à eficiência na conversão, no controle e na adequação da potência elétrica por meios estáticos, desde a entrada disponível até a forma de saída desejável.

Dentre os inúmeros dispositivos empregados na eletrônica de potência, destacam-se os inversores de frequência que operam com o sistema de Modulação por Largura de Pulso (PWM), contribuindo para o aumento da produtividade industrial (ABREU *et al.*, 1997). Todavia, nas centrais telefônicas, os inversores mais utilizados são os de tensão, os quais empregam componentes que operam em comutação entre os estados de condução (ligado) e corte (desligado) (JESZENSKY, 2004).

Conforme Jesus *et al.* (2003), comutação é o processo de transferência das correntes entre os dispositivos semicondutores que formam os conversores. Entretanto, esta definição está restrita à eletrônica de potência aplicada aos conversores, onde seu emprego é mais frequente. Portanto, eles se constituem nos principais geradores de harmônicos.

A eletrônica de potência vem sendo cada vez mais empregada na área da eficiência energética obtida com os avanços tecnológicos. Entretanto, trouxe consigo

um efeito indesejável, uma vez que as correntes produzidas pelos dispositivos caracterizam cargas não lineares. A não linearidade decorre do fato de que os conversores operam com a comutação de componentes eletrônicos. Obtém-se, portanto, uma função periódica, porém não senoidal, ou seja, contém a frequência fundamental e seus múltiplos harmônicos (HAYKIN; VEEN, 1999). Conforme Beaty *et al.* (2012), os dispositivos que utilizam a eletrônica de potência se constituem, atualmente, nas cargas não lineares mais comuns, com presença marcante em controladores de velocidade de motores, conversores AC–DC, carregadores de baterias, inversores de tensão e de frequência, além de reatores eletrônicos.

Os trabalhos referenciados de autores de livros e artigos de periódicos diversos apresentados neste capítulo são aplicáveis a qualquer sistema telefônico, inclusive na era das comunicações digitais.

O próximo capítulo apresenta diversos conceitos básicos que possibilitam as análises qualitativa e quantitativa das medidas realizadas em campo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos utilizados nas análises qualitativa e quantitativa das medições realizadas em campo durante a elaboração deste trabalho. Além dos fundamentos relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE) e à eletrônica de potência, são inseridas as grandezas elétricas associadas aos componentes harmônicos, incluindo-se as que são específicas de um sistema telefônico.

3.1 PRINCÍPIOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Uma distorção de forma de onda é considerada harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso, seu espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental (DECKMANN; POMILIO, 2010).

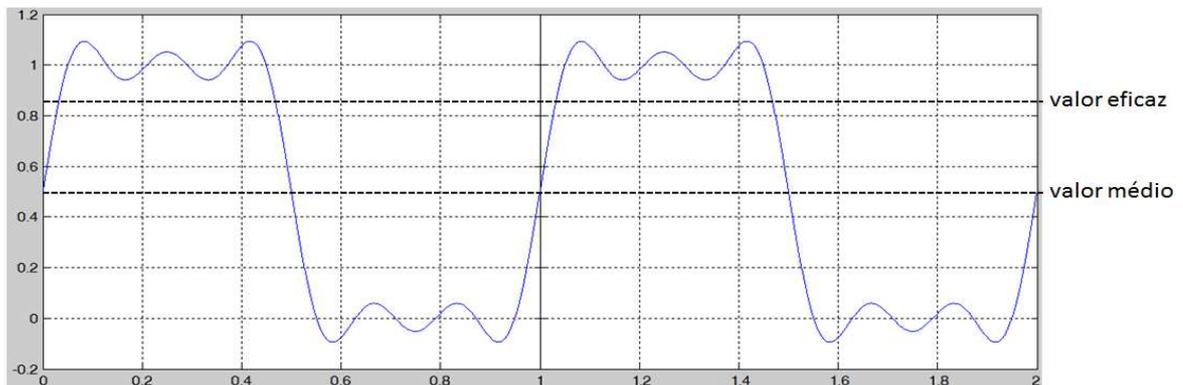
Uma função é dita periódica quando seus valores se repetem a intervalos de T segundos, ou seja, $f(t \pm nT) = f(t)$, para $n = 1, 2, 3, \dots$. Qualquer função periódica não senoidal encontrada na engenharia elétrica pode ser descrita em termos de funções senoidais com auxílio das séries de Fourier (HAYKIN, 2004), na forma:

$$f(t) = \underbrace{a_0}_{CC} + \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)]}_{CA} \quad (1)$$

em que $\omega_0 = 2\pi/T$ é a frequência fundamental. Observe-se que a função é composta de duas parcelas, sendo que uma parte é fixa (valor médio da função) e outra parte é variável. Na parte variável, as frequências vão aumentando de valor, que é sempre múltiplo inteiro da frequência fundamental. Na Figura 3 é mostrado um exemplo de

função periódica, com destaques para o valor médio¹ e o valor eficaz². Esta função não é senoidal, porém é formada pela soma dos componentes até a quinta ordem, razão pela qual tem a forma apresentada. A figura foi traçada com o aplicativo MATLAB.

Figura 3 - Função periódica não senoidal



As tensões e as correntes não senoidais são produzidas por cargas não lineares, cada vez mais comuns nos dias atuais, como dispositivos de eletrônica de potência, fontes de alimentação comutadas, lâmpadas fluorescentes compactas, fornos de indução, entre outras (FUCHS; MASOUM, 2008).

Uma carga é denominada linear quando a corrente que a atravessa tem a mesma forma da tensão que a excita. Portanto, se a carga for excitada por uma tensão senoidal, a corrente deverá ser igualmente senoidal, conforme a Figura 4, traçada com o aplicativo MATLAB.

Quando a corrente que circula pela carga apresenta uma forma diferente da tensão que a excita, sua forma não será mais senoidal. Diz-se, portanto, que a corrente apresenta distorção harmônica, ou, ainda, que apresenta componentes

¹ O valor médio de uma função variável no tempo, $\overline{f(t)}$, com período T , é dado pela expressão:

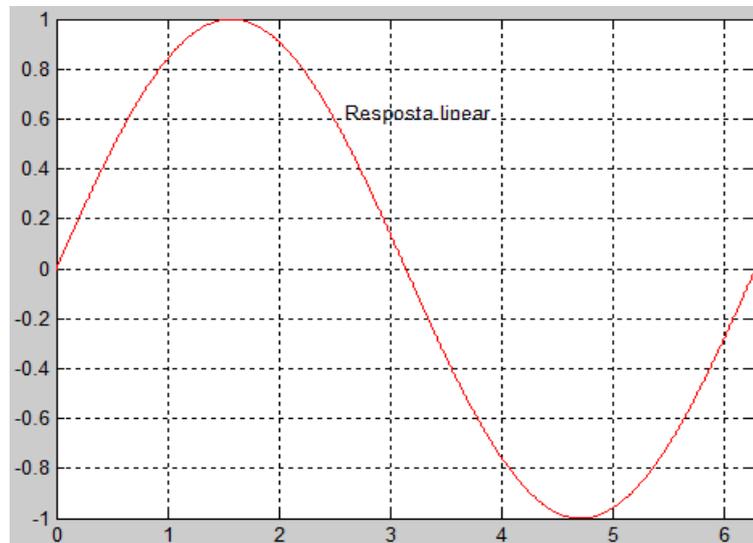
$$\overline{f(t)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t) dt.$$

² O valor eficaz de uma função variável no tempo, $f(t)_{rms}$, com período T , é dado pela expressão:

$$f(t)_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} [f(t)]^2 dt}.$$

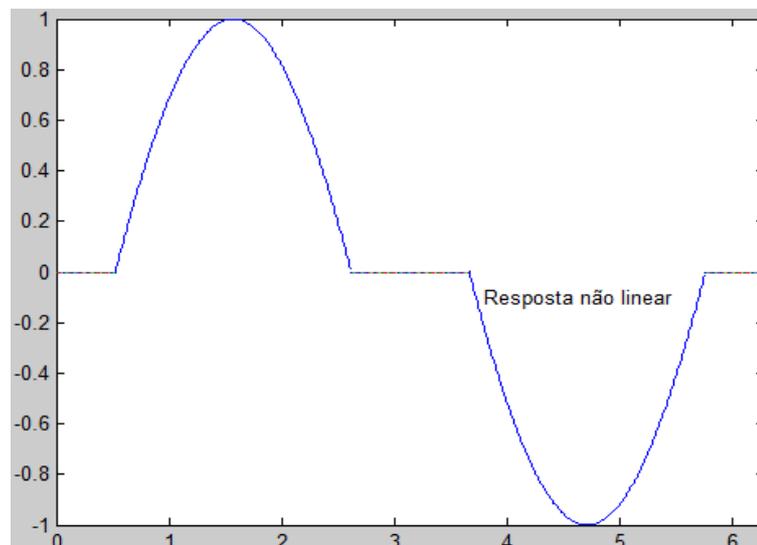
harmônicos.

Figura 4 - Curva da corrente em uma carga linear



Na Figura 5, traçada com o aplicativo MATLAB, é mostrada uma curva hipotética de resposta não linear que, apesar de distorcida, continua sendo periódica. Para melhor visualização, na figura aparece somente um período da onda.

Figura 5 - Curva da corrente em uma carga não linear



Na Figura 6, traçada com o aplicativo MATLAB, é mostrada uma comparação entre as curvas das correntes em cargas lineares (traçado em vermelho) e em não lineares (traçado em azul). Pode-se observar na curva de resposta não linear que a

condução de corrente ocorre somente após alguns instantes, ou seja, após a tensão ter atingido um valor mínimo para que a carga permita a passagem de corrente elétrica. Trata-se de uma situação típica de um conversor CA – CC, que é uma carga capaz de gerar forte distorção harmônica.

Figura 6 - Comparação entre curvas de correntes em cargas lineares e em não lineares

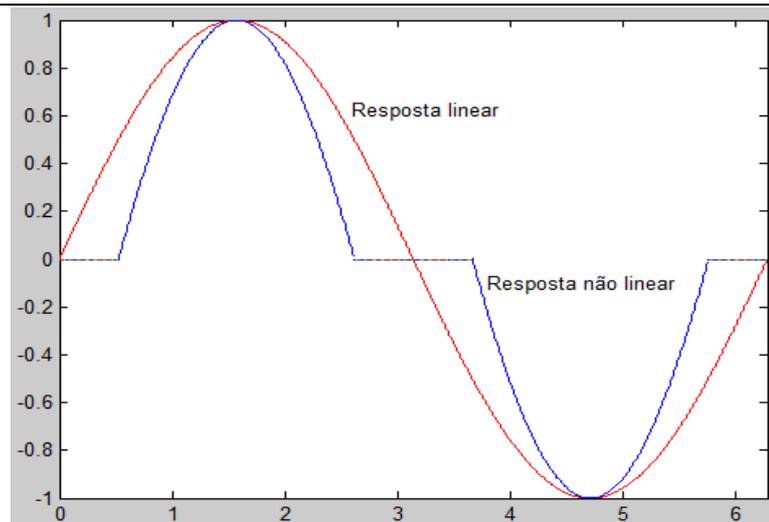


Figura 6-a: Comparação das curvas.

```

1  %Traçado de um gráfico para mostrar a diferença entre uma função periódica
2  %linear e uma não linear
3  close all, clear all, clc
4  x = 0: 0.01: 2*pi;
5  y = sin(x);
6  plot(x, y, 'r');
7  text(2.6, 0.62, 'Resposta linear');
8  hold on
9  x = 0: 0.01: pi/6;
10 % x = linspace(0, 2*pi, 1024);
11 y = 0;
12 plot(x, y)
13 hold on
14 x = pi/6: 0.01: pi-pi/6;
15 y = 2*(sin(x)-sin(pi/6));
16 plot(x, y)
17 hold on
18 x = pi-pi/6: 0.01: pi+pi/6;
19 y = 0;
20 plot(x, y)
21 hold on
22 x = pi+pi/6: 0.01: 2*pi-pi/6;
23 y = 2*(sin(x)+sin(pi/6));
24 plot(x, y)
25 hold on
26 x = 2*pi-pi/6: 0.01: 2*pi;
27 y = 0;
28 plot(x, y)
29 text(3.8, -0.1, 'Resposta não linear');
30 % grid
31 axis([0 2*pi -1 1])

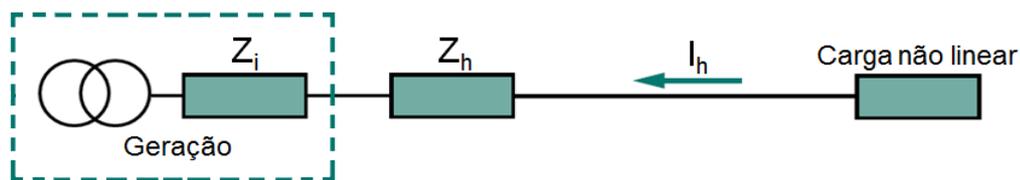
```

Figura 6-b: Sequência de comandos.

As correntes harmônicas se somam ao componente fundamental, o que faz com que o consumo aumente. Na Figura 7 é mostrado um circuito equivalente para as correntes I_h que, ao circularem pela rede, produzem tensões harmônicas nas

impedâncias Z_h do circuito, inclusive nos equipamentos de geração com impedância interna Z_i . Como a impedância depende da frequência, haverá uma tensão harmônica para cada componente de corrente. Conseqüentemente, as tensões harmônicas individuais se somarão, produzindo distorções. Para dispositivos de geração que possuem alta impedância interna, a situação se torna mais crítica, pois a diferença de potencial entre os terminais do gerador, devida às correntes harmônicas, será tanto maior quanto maior for a impedância e quanto maior for o valor de cada componente harmônica de corrente. As correntes harmônicas produzidas pelas cargas não lineares serão absorvidas pelas outras cargas com perturbações naquelas mais sensíveis.

Figura 7 - Diagrama unifilar equivalente das correntes harmônicas



3.1.1 Principais grandezas associadas à distorção harmônica

Conforme Fuchs e Masoum (2008), os harmônicos de tensão e de corrente podem ser espaciais e temporais. Os harmônicos temporais estão associados ao fluxo magnético de máquinas rotativas síncronas e de indução, causadas principalmente pela assimetria da estrutura física do estator e do rotor. Os harmônicos do fluxo magnético poderão induzir tensões harmônicas temporais nos circuitos do estator e do rotor que, por sua vez, poderão gerar correntes harmônicas temporais.

Devido ao objetivo deste trabalho, serão abordados somente os harmônicos temporais associados às cargas não lineares, embora possam ser causadas por outras condições irregulares do sistema elétrico, tais como saturação de núcleos magnéticos e desbalanceamento de tensões.

As principais grandezas relativas à distorção harmônica estão apresentadas a seguir, com ênfase nas mais importantes para formas de onda não senoidais.

3.1.1.1 Valor eficaz de uma forma de onda não senoidal

Para um sinal qualquer $y(t)$ não senoidal, tal que $y(t) = Y_m \cos(\theta_n - \phi_n)$, seja de tensão ou de corrente, tem-se (FUCHS; MASOUM, 2008):

$$Y_{rms} = \sqrt{Y_{CC}^2 + (Y_{rms}^{h1})^2 + (Y_{rms}^{h2})^2 + (Y_{rms}^{h3})^2 + \dots + (Y_{rms}^{hN})^2} \quad (2)$$

Na expressão acima, N representa a ordem mais elevada, enquanto que h_i representa a ordem de cada harmônica individualmente.

Para um sinal de tensão ou de corrente, quanto maior a distorção harmônica maior será o valor eficaz total.

3.1.1.2 Fator de crista (k)

Esta grandeza é de grande importância, pois define a presença de valores de pico muito elevados em relação ao valor eficaz (SCHNEIDER, 2003). É a relação entre o valor máximo e o valor eficaz do sinal $y(t)$. A expressão é a mesma para sinais senoidais e não senoidais, apresentada abaixo para a corrente:

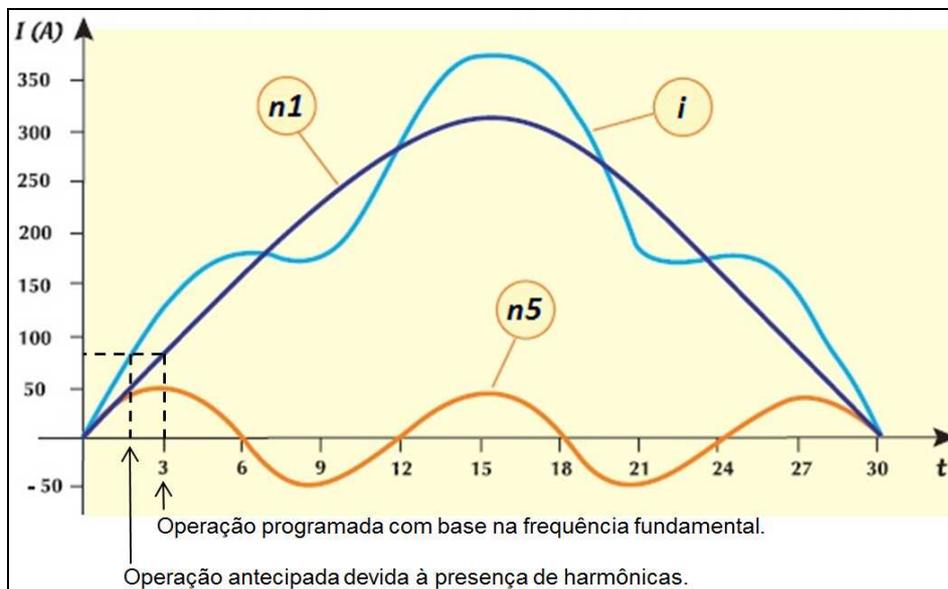
$$k = \frac{Y_m}{Y_{rms}} \quad (3)$$

Este fator está fortemente relacionado ao disparo de componentes controlados em fase, como é o caso de retificadores utilizados em centrais telefônicas. Para correntes ou tensões sem distorções, seu valor é $\sqrt{2}$. Nas cargas não lineares os valores são bem maiores e, em casos críticos, pode chegar a 5 (SCHNEIDER, 2005).

Na Figura 8 é mostrado um exemplo relacionado à operação de um

dispositivo de proteção. A corrente $n1$ não contém harmônicos e um determinado retificador controlado em fase foi configurado para operar com 85 A, com disparo no tempo $t = 3u$. Na presença da quinta harmônica ($n5$), obtém-se a corrente resultante i . Pode-se observar que o disparo do dispositivo ocorrerá antes do previsto, o que poderá trazer transtornos a um sistema, uma vez que o tempo de condução tem influência direta no valor eficaz da grandeza.

Figura 8 - Curvas representativas da fundamental, da 5ª. Harmônica e da resultante. Fonte: PROCOBRE



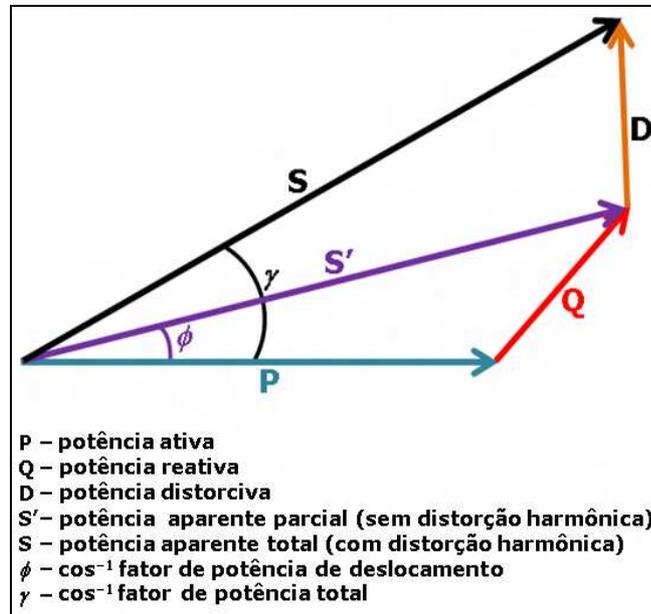
3.1.1.3 Fator de potência

É a relação entre a potência ativa P e a potência aparente S . Não se deve confundir com o cosseno do ângulo ϕ , pois este está relacionado somente à corrente em sua frequência fundamental, também denominado *fator de potência de deslocamento* (fp_d). Dentro do contexto dos componentes harmônicos, deve-se acrescentar, portanto, a potência consumida por elas, denominada potência distorciva (D).

Na Figura 9 são mostrados os elementos associados ao conceito de fator de potência. P é a potência ativa, Q a potência reativa e D a distorciva, relacionadas entre si pela expressão:

$$\mathbf{S}^2 = \mathbf{P}^2 + \mathbf{Q}^2 + \mathbf{D}^2 \quad (4)$$

Figura 9 - Tetraedro de potência



O fator de potência total é o cosseno do ângulo γ e o diagrama obtido denomina-se *tetraedro de potência*, em vez de *triângulo de potência* (BEATY *et al.*, 2012).

A partir do tetraedro de potência, tem-se que (FUCHS; MASOUM, 2008):

$$fp_t = \cos \gamma = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (5)$$

É importante ressaltar que a potência ativa e a reativa da expressão acima se referem somente à componente fundamental.

Pode-se definir o fator de potência total (fp_t) em termos das correntes, pela expressão abaixo (SHAFFER, 2007):

$$fp_t = \frac{I_{1,RMS}}{\underbrace{I_{RMS}}_{fp_h}} \underbrace{\cos \phi}_{fp_d} \quad (6)$$

$I_{1,RMS}$ é o valor eficaz da componente fundamental da corrente, enquanto I_{RMS} é o valor eficaz da corrente total. A relação entre ambas as correntes define o fator de potência distorcivo (fp_h). O fator de potência total pode ser, portanto, resumido pela expressão:

$$fp_t = fp_h \cdot fp_d \quad (7)$$

O consumo de energia de uma central telefônica de grande porte é elevado. Tendo em vista que a multa por baixo fator de potência é proporcional ao valor do consumo, é importante que as distorções harmônicas sejam minimizadas neste aspecto, além daqueles relacionados às interferências em cargas sensíveis.

3.1.1.4 Taxa Individual de Harmônicos

É a relação porcentual entre a harmônica de ordem h e a fundamental (SCHNEIDER, 2003). Para a taxa de correntes, tem-se:

$$i_h(\%) = \frac{I_h}{I_1} \quad (8)$$

Esta grandeza permite avaliar a percentagem de cada componente, tendo em vista a importância de analisar o quanto cada uma delas poderá interferir em algum circuito da central ou mesmo nas linhas telefônicas no percurso interno da central.

3.1.1.5 Distorção Harmônica Total

Trata-se do parâmetro mais empregado para indicar o conteúdo harmônico de um sinal $y(t)$ (FUCHS; MASOUM, 2008), definido pela expressão:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{T} (Y^{(h)})^2}}{Y^{(1)}} \quad (9)$$

A importância da DHT está na avaliação do conteúdo harmônico diante das normas regulatórias e das recomendações pertinentes, além de permitir controlar efeitos indesejados em cargas sensíveis do sistema telefônico.

3.1.1.6 Fator de Influência Telefônica (FIT)

É um parâmetro específico para um sistema telefônico (FUCHS; MASOUM, 2008). Ele é apresentado tendo em vista o objetivo deste trabalho e levando-se em conta que as interferências de um sistema de energia nas comunicações telefônicas costumam se apresentar na forma de ruído eventualmente audível. De modo semelhante à DHT, leva em conta os efeitos das distorções harmônicas em um sistema de comunicação telefônica, porém com a diferença de que o ruído resultante da interferência deve ser ponderado por fatores que refletem a resposta do ouvido humano. A expressão desenvolvida nos Estados Unidos utiliza fatores de ponderação para interface telefônica w_i . No Brasil, os fatores empregados são para interface *mensagem* C . Entretanto, a expressão é similar, mudando-se apenas o fator de ponderação:

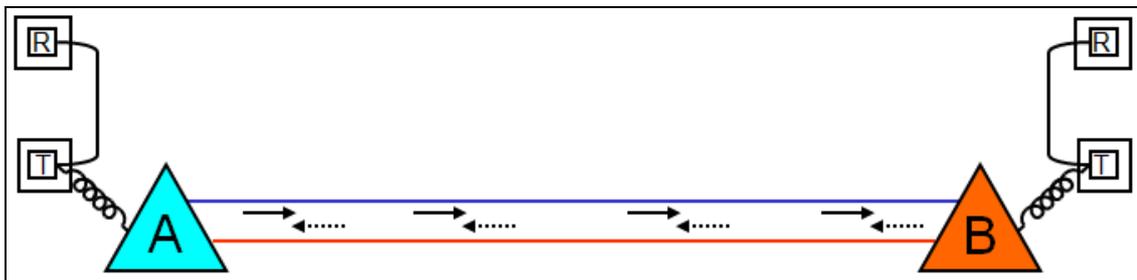
$$C = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (c_i I^{(i)})^2}}{I_{rms}} \quad (10)$$

Na expressão acima, “ c_i ” são os fatores de ponderação para os harmônicos de ordem i , propostos pela União Internacional de Telecomunicações (UIT, 1988).

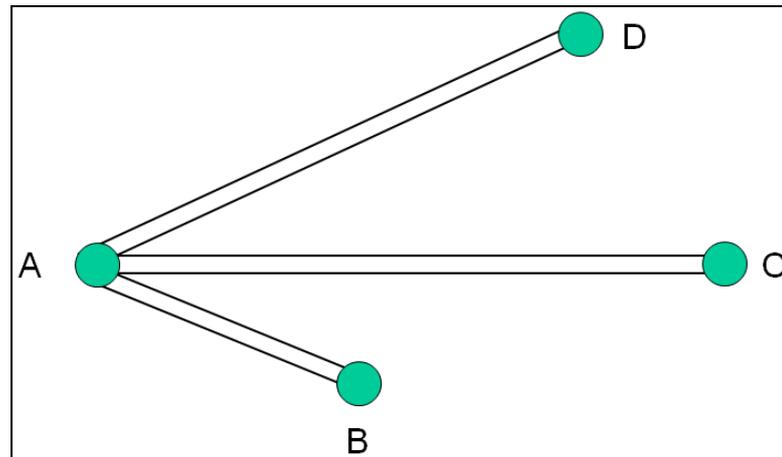
3.2 FUNDAMENTOS DE UM SISTEMA TELEFÔNICO

Uma comunicação simples envolve somente a conexão entre dois pontos A e B através de um elemento denominado *meio de transmissão* (JESZENSKY, 2004) (Figura 10). Em telefonia, convencionou-se chamar de *assinante A* aquele que origina a chamada e de *assinante B* aquele que recebe a chamada (BARRADAS, 1995).

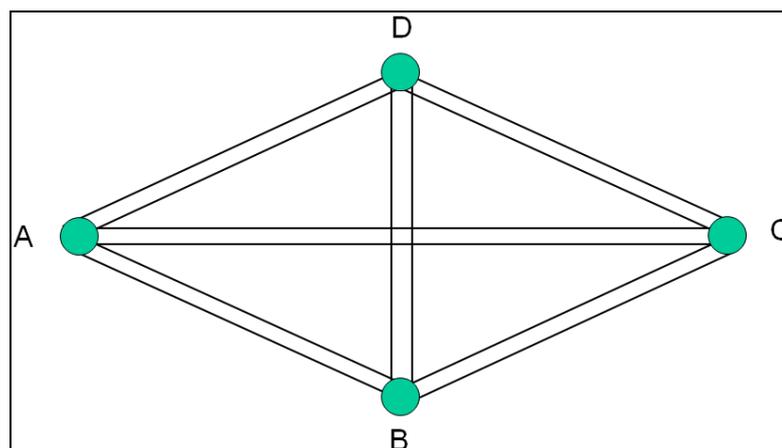
Figura 10 - Comunicação simples



A topologia acima restringe demais a utilização do meio de transmissão, pois outras pessoas podem desejar se comunicar, por exemplo, com A. Teríamos a topologia da Figura 11, denominada *ponto-multiponto* (JESZENSKY, 2004), na qual C e D desejam se comunicar com A.

Figura 11 - Comunicação com topologia *ponto-multiponto*

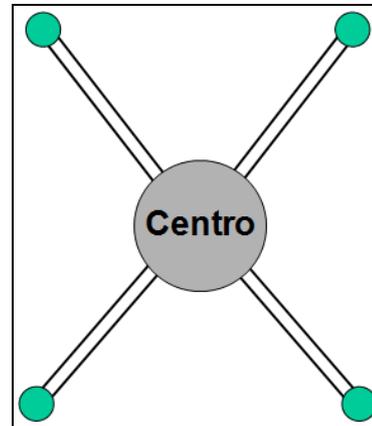
Mas pode acontecer que tenhamos uma situação em que A, B, C e D desejem se comunicar todos entre si. Assim, teríamos a topologia denominada *multiponto*, mostrada na Figura 12 (JESZENSKY, 2004). Pode-se perceber que o aumento substancial de pessoas querendo se comunicar levaria a uma topologia bastante complicada, pois deveria haver várias linhas telefônicas conectadas a cada usuário do serviço, conforme o interesse em se comunicar com este ou aquele assinante.

Figura 12 - Comunicação com topologia *multiponto*

Daí que surge o conceito de *central telefônica*, na qual uma estrutura central permite que qualquer usuário possa se comunicar com outro através de uma técnica denominada *comutação de circuitos* (Figura 13). Esta técnica é bastante abrangente em termos de aplicações, mas neste caso específico consiste em conectar alguém

que fez a chamada para o centro com alguém a ser chamado.

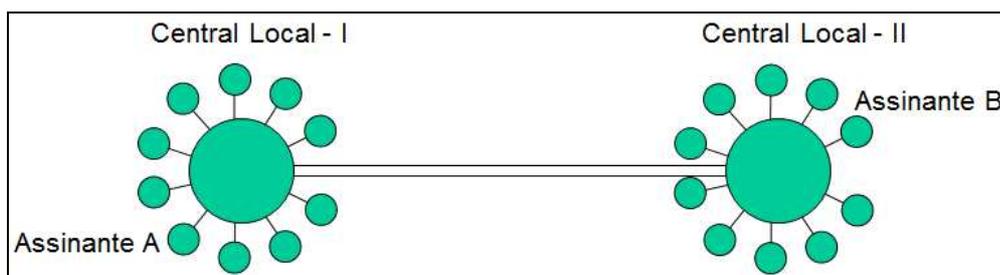
Figura 13 - Comunicação com ponto central



Com o crescimento da demanda e a limitação da capacidade de cada central telefônica, tornou-se necessário instalar outras centrais. Cada uma delas atende determinada área e se interliga com as demais. Na Figura 14 é mostrada a topologia para uma comunicação entre dois usuários conectados a centrais diferentes. Para que o assinante *A*, conectado à central local I, possa falar com o assinante *B*, conectado à central local II, será necessário que as duas centrais estejam interligadas para que a comunicação se realize.

A presença das duas centrais permite que se introduza o conceito de *rede*. Neste caso, trata-se de uma rede de pequena dimensão que abrange, provavelmente, dois bairros vizinhos.

Figura 14 - Comunicação entre usuários conectados a centrais diferentes

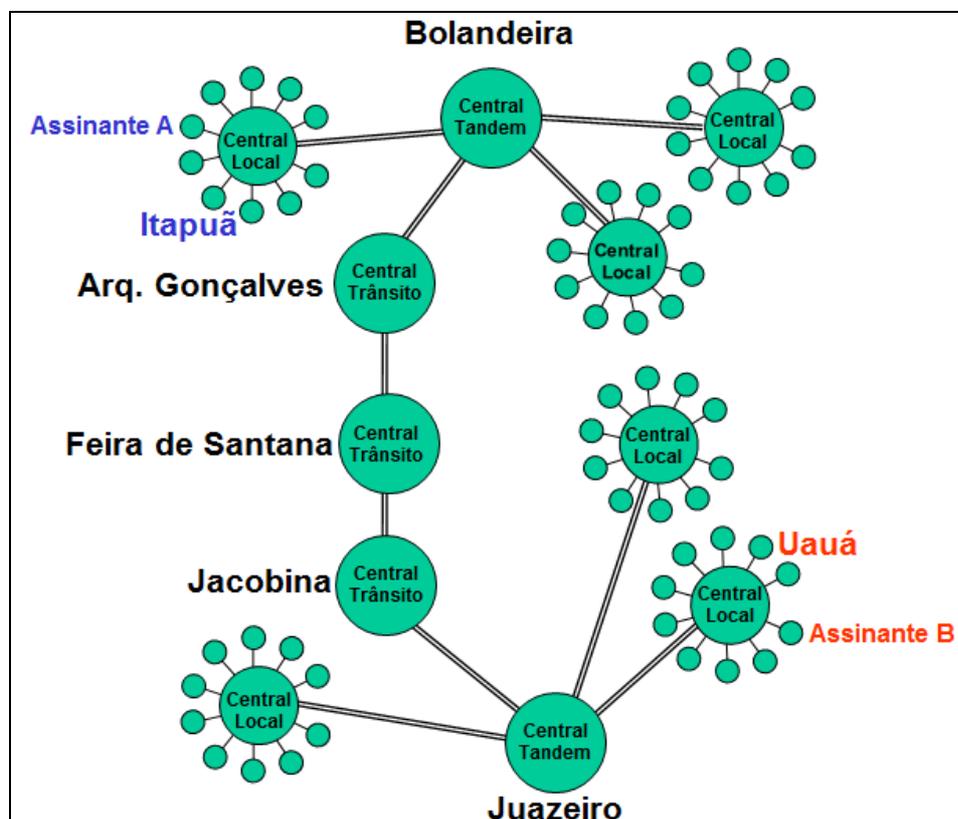


O assinante A pode, eventualmente, desejar estabelecer uma comunicação com um assinante B, localizado em um ponto distante. Trata-se de uma *chamada de longa distância*, podendo envolver entroncamentos entre centrais que pertencem a *códigos de área* diferentes.

Da mesma forma que razões de ordem técnica e econômica levaram a engenharia à implantação de um *centro de comutação* (central telefônica) com o objetivo de otimizar as comunicações, surgiu a necessidade de se implantar uma central que interligasse várias centrais locais (*central tandem*). A implantação deste conceito possibilitou simplificar a estrutura da rede que interliga as diversas centrais.

A Figura 15 mostra um exemplo simplificado da topologia envolvendo uma eventual chamada de longa distância entre o bairro de Itapuã, em Salvador e a cidade de Uauá, no interior da Bahia. A chamada envolve centrais da área 75 (com centro principal em Feira de Santana) e da área 74 (com centro principal em Jacobina).

Figura 15 - Comunicação de longa distância entre dois usuários



A topologia de uma chamada de longa distância pode variar de acordo com as localizações dos assinantes *A* e *B*. A *central de trânsito* é aquela que concentra as chamadas que se destinam a outra área de tarifação. Por exemplo, a chamada originada em Itapuã deverá passar por uma central de trânsito da área 71 para que a tarifação da chamada interurbana seja processada. Como a chamada se destina a uma localidade da área 74, a central de trânsito de Arquimedes Gonçalves (área 71) encaminhará a chamada para a central de trânsito de Jacobina (área 74). Este encaminhamento não necessariamente terá que passar pela central de Feira de Santana, pois a conexão poderá ser direta. A central de Jacobina, por sua vez, encaminhará a chamada para Uauá, através de Juazeiro, que concentra as centrais locais da região.

Podem ocorrer situações em que o interesse de tráfego telefônico é tal que uma central local pode estar conectada diretamente a uma central de trânsito de outra área. Para tanto será necessário que a central local seja dotada de recursos de tarifação, o que é perfeitamente factível nos dias atuais, tendo em vista que as centrais telefônicas são digitais.

A complexidade do sistema telefônico interligado levou as concessionárias a dividir as atividades de planejamento, implantação, operação e manutenção em *redes*, de modo a facilitar todas as ações pertinentes à prestação do serviço, considerado de utilidade pública pela ANATEL.

Por conseguinte, o sistema telefônico é atualmente formado por diversas redes que atuam de forma coordenada, com funções específicas assim distribuídas:

- Rede de assinantes
- Rede de comutação
- Rede de sinalização
- Rede de transporte
- Rede de supervisão

A rede de assinantes é formada pelas linhas telefônicas e pelos equipamentos terminais instalados nas centrais telefônicas, os quais se conectam aos aparelhos telefônicos.

A rede de comutação é formada pelas centrais telefônicas, as quais atuam como computadores de grande porte e que processam e encaminham as chamadas

originadas pelos usuários.

A rede de sinalização é formada pelos circuitos que geram e processam as informações de controle que trafegam na rede de comutação, não apenas dentro das próprias centrais como também nos entroncamentos entre elas. Além da conversação telefônica, existem sinais utilizados pelas centrais com o objetivo de processar, encaminhar, tarifar e controlar as chamadas.

A rede de transporte é formada pelos entroncamentos entre duas ou mais centrais, não apenas em chamadas locais, mas também em chamadas interurbanas (nacionais e internacionais). Fazem parte desta rede os equipamentos de micro-ondas (terrestres e via satélite) e os cabos de fibras ópticas.

As redes acima necessitam de acompanhamento para efeito de gerência e de ações de operação e manutenção. A rede de supervisão se encarrega desses processos.

Cada uma das redes mencionadas é dotada de equipamentos sofisticados, muitos dos quais são controlados por sistemas microprocessados. Em razão disso, a quantidade de equipamentos sensíveis à QEE é considerável. A sensibilidade é agravada em razão do tipo de suprimento de energia necessário, geralmente tensão contínua. Portanto, esses tipos de dispositivo necessitam de conversores CA-CC, que são importantes fontes de distorção harmônica (RASHID, 1999).

Todas as redes que integram o sistema telefônico devem operar de forma integrada, de forma a assegurar o serviço dentro das metas estabelecidas pelo órgão regulador. Para tanto, as concessionárias costumam implantar sistemas de geração própria, prontos para entrarem em operação em eventual falha por parte da concessionária de energia.

Os equipamentos das redes podem ser abrigados em um prédio ou em uma cabine, e podem se constituir em cargas essenciais (aquelas que não podem ficar sem alimentação sob a pena de comprometer a qualidade do serviço e a segurança) e em cargas não essenciais, no caso contrário. O do tipo cabine é mais comum em estações repetidoras, enquanto que o prédio é mais utilizado em estações de grande porte.

Apesar de essenciais na prestação do serviço telefônico, as centrais são alimentadas por sistemas que produzem grande quantidade de componentes

harmônicos, as quais podem causar não apenas impactos na alimentação de cargas sensíveis como também interferências eletromagnéticas em sistemas de comunicações (RASHID, 1999). Podem, por outro lado, provocar aquecimento excessivo em condutores, motores e transformadores (IEEE Std 141, 1993).

As concessionárias de serviço público de telefonia utilizam o serviço das concessionárias de energia elétrica, tanto nos prédios quanto nas cabines, porém costumam implantar seus sistemas de geração própria, para o caso eventual de interrupção, tendo em vista que o serviço de telefonia é considerado de utilidade pública. A qualidade do serviço telefônico é acompanhada por agências reguladoras que, no Brasil, está a cargo da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações). O monitoramento da qualidade é feito mediante análise de indicadores operacionais definidos pela agência³. Estes indicadores refletem as condições de funcionamento dos equipamentos do sistema telefônico e outros aspectos que podem afetar o grau de satisfação dos usuários. Os indicadores são obtidos de forma automatizada, nos dias atuais, ou seja, a rede de supervisão registra os eventos em computadores e disponibiliza as informações em bancos de dados para serem analisados oportunamente.

Embora não se possa associar o subsistema de energia a uma rede propriamente dita, todos os equipamentos dependem dele. Alguns elementos das redes mencionadas anteriormente não podem ficar sem energia elétrica, sob o risco da qualidade de serviço ficar comprometida. Outros elementos, embora importantes, não comprometem a qualidade do serviço ao usuário.

As cargas essenciais integram o conjunto de equipamentos que não podem ficar sem energia elétrica, visto que estão diretamente associados ao serviço prestado, como é o caso da central de comutação, roteadores, transceptores de micro-ondas, transceptores ópticos etc. As cargas não essenciais formam o conjunto de equipamentos que podem ficar sem energia durante algum período, como é o caso das áreas administrativas, almoxarifado, garagem etc.

³ Os indicadores operacionais da ANATEL são parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da prestação do serviço pelas concessionárias. Tais parâmetros são definidos por Normas e referendados por Resoluções publicadas e revistas periodicamente para se adequarem às novas tecnologias e permitirem maior participação do usuário. Alguns indicadores estão relacionados ao atendimento às reclamações e às solicitações e outros estão relacionados ao desempenho do sistema telefônico. Neste trabalho foram destacados apenas aqueles que estão associados ao segundo caso, isto é, que dependem dos equipamentos da Central Telefônica.

Para garantir o funcionamento das cargas essenciais, costuma-se instalar um sistema de geração própria que é acionado quando ocorre falta de energia. Este acionamento pode ser manual ou automático, mas geralmente ocorre de forma automática. Eles podem variar em termos de capacidade e de complexidade, conforme o porte da central. Nas repetidoras e nas estações radiobases, por razões óbvias, o sistema de energia é mais simplificado do que em uma central de grande capacidade.

A Central Telefônica é o equipamento que processa uma chamada telefônica e efetua o seu encaminhamento, além de realizar a tarifação. É a principal carga alimentada por tensão contínua e, também, o sistema que envolve os principais indicadores operacionais de qualidade de serviço que dependem do funcionamento adequado da Central, quais sejam (ANATEL, 2012):

- a. Taxa de completamento de chamadas para o Centro de Atendimento de Serviços;
- b. Taxa de completamento de chamadas locais;
- c. Taxa de completamento de chamadas de longa distância nacionais originadas;
- d. Taxa de completamento de chamadas de longa distância internacionais terminadas.

Estes indicadores envolvem apenas o Serviço Telefônico Fixo Comutado (STFC). As operadoras do Sistema de Comunicações Móveis (SCM) que prestam serviços de telefonia em suas redes, dentro dos limites permitidos pela regulamentação, não estão sujeitas ao Plano Geral de Metas de Qualidade (PGMQ) (ANATEL, 2002).

É factível salientar que poucos estudos nesta área foram encontrados na literatura correlata uma vez que esses sistemas atuam na retaguarda, de forma imperceptível para aqueles que não se envolvem diretamente com os sistemas de geração própria (SOARES *et al.*, 2012).

3.2.1 Cargas sensíveis a componentes harmônicos em centrais telefônicas

As cargas consideradas sensíveis a componentes harmônicos são:

Linhas telefônicas – As linhas dos assinantes estão expostas a vários tipos de interferência eletromagnética, desde as residências. Tais linhas percorrem o interior da central até chegar ao equipamento de comutação. Neste ambiente, os harmônicos que se propagam a partir do sistema de geração própria causam tensões induzidas nas linhas dos assinantes, capazes de provocar ruído nas comunicações.

Equipamento de comutação – As centrais modernas utilizam a tecnologia digital, que se baseia na técnica de amostragem do sinal analógico da voz, a uma taxa de 8000 vezes por segundo, sincronizada por um relógio de 8 kHz (JESZENSKY, 2004). Este sinal de sincronismo também pode ser afetado por harmônicos de ordem elevada. Além disto, a sinalização das centrais situa-se na faixa até 4 kHz, porém com níveis na faixa de microwatts, ou seja, pode ser interferida por harmônicos de alta ordem não detectáveis por analisadores de energia, mas somente por analisadores de espectro.

Sistema de telessupervisão – As facilidades de um sistema telefônico são monitoradas para efeitos de operação, atendimento de reparos, ativação e desativação de circuitos e registro de dados estatísticos. Os equipamentos são microprocessados e podem sofrer interferência eletromagnética capaz de comprometer o funcionamento.

Transformadores – Os harmônicos de tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto as de corrente aumentam as perdas nos condutores de cobre e exercem maior influência das capacitâncias parasitas entre as espiras e entre os enrolamentos (BEATY *et al.*, 2012).

Cabos de alimentação – Redução da seção condutora devido ao efeito pelicular, maior perda ôhmica devida às correntes harmônicas e aumento na resistência do condutor devido ao efeito dos campos magnéticos causados por condutores próximos.

Capacitores – Possibilidade de ocorrência de ressonância excitada pelos harmônicos e redução da reatância capacitiva com a frequência, o que ocasiona

aumento das correntes relativas aos componentes harmônicos presentes na tensão.

Equipamentos eletrônicos – Aparelhos que utilizam cruzamento com zero para realizar alguma ação, podem ter seu funcionamento afetado pela presença de componentes harmônicos, principalmente aqueles que funcionam com acoplamentos indutivos e capacitivos (KUSKO; THOMPSON, 2007).

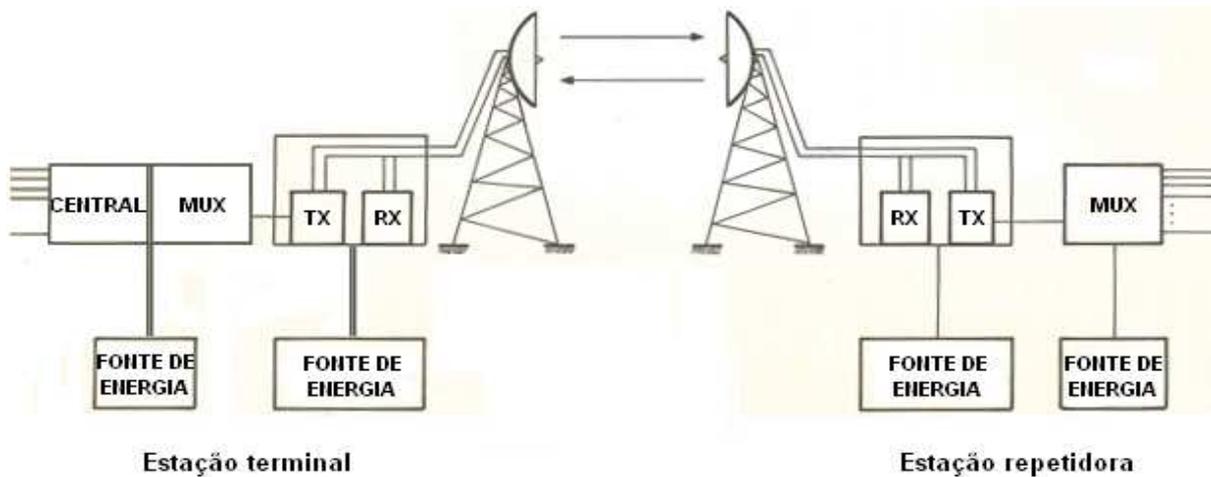
Aparelhos de medição com disco de indução – Em medidores com disco de indução podem surgir erros em função de eventuais harmônicos surgidos em consequência de ressonâncias que possam afetar a grandeza medida (BEATY *et al.*, 2012).

Relés de proteção e fusíveis – Maior aquecimento dos dispositivos de proteção diante da presença dos componentes harmônicos, com redução da vida útil e operação inadequada (IEEE – PES, novembro/1992) e a falha em relés de proteção pode provocar afundamentos de tensão, o que afeta a qualidade de energia (IEEE PSRC, 1992).

3.2.2 Características do sistema de geração própria

Um sistema telefônico, em condições normais, é alimentado a partir da energia da concessionária. A geração própria atua como um sistema de reserva para assegurar a continuidade de serviço aos usuários de telefonia. Assim, o suprimento de energia é necessário não só nas estações terminais como nas repetidoras, tendo em vista as chamadas de longa distância. Na Figura 16 é mostrada a interligação entre uma *Estação Terminal*, na qual estão instaladas as *Centrais Telefônicas* e os *Transceptores* (TX – RX) e uma *Estação Repetidora*, na qual estão instalados os equipamentos responsáveis pela retransmissão dos sinais gerados no *Terminal* (BARRADAS; SILVA, 1980). Geralmente não existem centrais telefônicas nas repetidoras, razão pela qual os equipamentos de energia são mais simples, exceto nos casos em que a estação envolve múltiplas derivações de rotas de canalização pesada ou tem dupla função, isto é, trata-se de um *terminal/repetidor*.

Figura 16 - Diagrama de interligação entre Terminal e Repetidora (BARRADAS; SILVA, 1980)



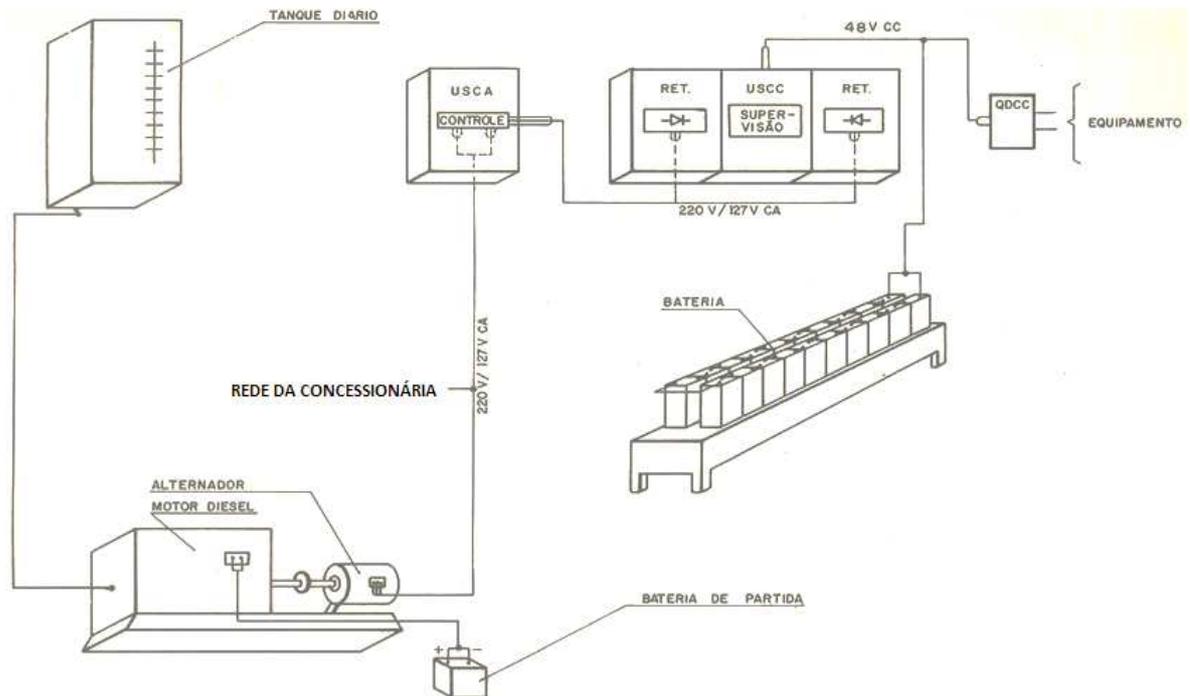
Na sua composição, a geração própria compreende uma fonte de tensão alternada, formado pelo GMG, e uma fonte de tensão contínua (conversor CA-CC, conversor CA-CA e acumuladores), juntamente com seus equipamentos associados, como a Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (USCA) e Unidade de Supervisão de Corrente Contínua (USCC).

Diante do aspecto crítico da energia em um serviço de utilidade pública, deve haver a preocupação com a QEE, mesmo quando se trata da autogeração, posto que as cargas não lineares são alimentadas a partir do GMG em um dado momento. A distorção harmônica gerada por elas irá se propagar pelos circuitos alimentados pelo gerador, dentro do próprio ambiente da central.

Na Figura 17 (BARRADAS; SILVA, 1980) é mostrado um diagrama simplificado de um sistema de geração própria, no qual podem ser vistos tanto o sistema de corrente alternada como o sistema de corrente contínua, com destaque para os acumuladores (bateria).

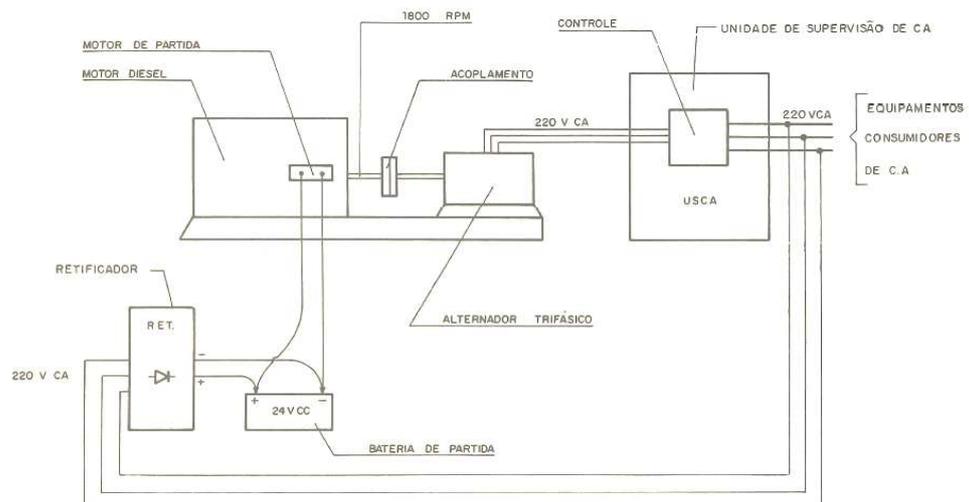
O fornecimento de energia em corrente contínua é assegurado pelos acumuladores elétricos, que são as baterias estacionárias. Isto explica o fato dos telefones continuarem funcionando, mesmo quando ocorre interrupção de energia da concessionária. Entretanto, o funcionamento só estará assegurando durante o tempo de autonomia dos acumuladores.

Figura 17 - Sistema de Geração Própria (BARRADAS; SILVA, 1980)



No sistema de geração própria em corrente alternada de uma central telefônica Figura 17 (BARRADAS; SILVA, 1980) existem vários equipamentos, cada um com sua função específica que será descrita a seguir.

Figura 18 - Geração própria em corrente alternada (BARRADAS; SILVA, 1980)



3.2.3 Grupo motor gerador

O grupo motor gerador é formado por um motor a óleo diesel e por um alternador monofásico ou trifásico, conforme o porte da central.

Os alternadores são máquinas síncronas destinadas a converter energia mecânica em energia elétrica, fornecendo corrente alternada com tensão e frequência fixas. A energia mecânica transferida ao alternador é obtida a partir de um motor que utiliza o óleo diesel como combustível.

Nas centrais telefônicas de grande porte, devido à potência da carga instalada, são utilizados geradores trifásicos por apresentarem importantes vantagens econômicas e operacionais (FITZGERALD *et al.*, 2006). Entretanto, em algumas repetidoras, poderão ser encontrados sistemas com geração própria monofásica. Nelas existem vários equipamentos que são alimentados com tensão monofásica e poucos alimentados com tensão trifásica, razão pela qual a geração é feita com os enrolamentos do estator conectados em estrela, com o neutro aterrado.

No que concerne à QEE, no quesito distorção harmônica, uma grandeza elétrica do gerador, de grande importância, é a impedância de curto circuito. Entretanto, seu valor depende do ponto a ser considerado para a grandeza. Considerando-se que a distância entre os terminais do gerador e o quadro geral de distribuição é da ordem de 15 m, a resistência de curto circuito se torna desprezível. Assim, a impedância de curto circuito é influenciada fortemente pela reatância indutiva interna do alternador, a qual depende da frequência. Logo, os componentes harmônicos elevarão a impedância interna do alternador e, conseqüentemente, as tensões harmônicas fornecidas por ele às cargas sensíveis ficarão aumentadas.

3.2.4 Unidade de Supervisão de Corrente Alternada

Para um sistema de geração própria funcionar de forma ininterrupta, deve haver fornecimento permanente tanto de corrente contínua como de corrente alternada, pois existem equipamentos que dependem de uma ou de outra modalidade de corrente. Como as fontes de corrente contínua são as baterias que dependem diretamente da corrente alternada, a USCA assume importância

fundamental. Suas principais funções são: medição, sinalização, comando e proteção.

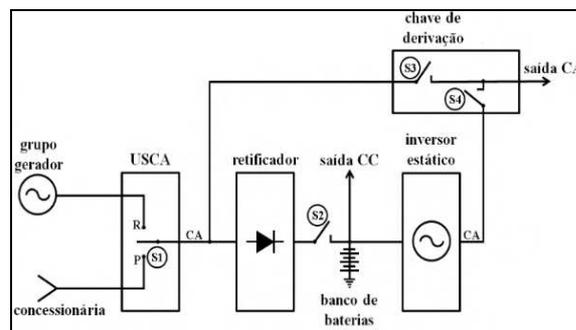
Nas centrais telefônicas a USCA supervisiona tanto os grupos geradores como as subestações. Para cada fonte existe um conjunto de circuitos e dispositivos que são responsáveis pelas funções mencionadas acima. O grupo gerador só alimentará os consumidores em caso de falha da rede comercial da concessionária de energia, ocasião em que a USCA transferirá a carga para ser alimentada pelo GMG. Quando a rede comercial volta ao normal, a USCA transferirá de volta a carga para ser alimentada pela rede comercial.

As USCAs modernas são equipamentos que funcionam à base de circuitos lógicos e de microprocessadores. Portanto, a distorção harmônica poderá causar interferência no sincronismo dos seus circuitos lógicos.

3.2.5 Conversor CA-CA

Durante o período entre a falha da rede comercial e a tomada de carga pelo grupo gerador o sistema fica a sem energia. É o intervalo de tempo em que a chave S1 transita entre as posições P e R Figura.

Figura 19 - Geração própria em corrente alternada (BARRADAS; SILVA, 1980)



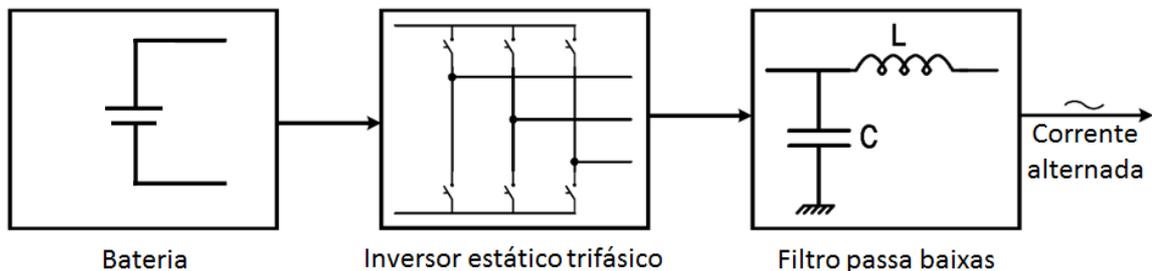
Esta transição não ocorre logo que a USCA detecta a falha da rede comercial. É necessário aguardar que o motor entre em regime normal de rotação e a tensão e a frequência do gerador estejam em condições normais de fornecimento. Alguns equipamentos alimentados com corrente alternada não podem deixar de receber

energia sob pena de terem o funcionamento comprometido, principalmente aqueles que utilizam tecnologia digital, pois dependem de sincronismo. Os conversores CC-CA, também conhecidos como inversores estáticos, suprem esta necessidade.

Os inversores estáticos são conhecidos como Fontes Ininterruptas de Energia (FIE) ou ainda como *no-breaks*. Em seu projeto são utilizados dispositivos semicondutores como chaves pela vantagem do menor porte, menor custo e maior eficiência no controle automático de potência, graças à eletrônica de potência. Esta nova área da eletrônica encontra aplicações em grande quantidade de equipamentos industriais, eletrodomésticos e acionadores com potência de menos de 1 HP até centenas de HP, linhas de transmissão de alta tensão em corrente contínua, reguladores de iluminação etc. (AHMED, 2009).

A Figura 20 mostra o diagrama básico de um conversor CC-CA trifásico típico utilizado em uma central telefônica.

Figura 20 - Diagrama básico de um conversor CC-CA trifásico



O conversor CA-CA representa a carga não linear que mais produz distorção harmônica, embora existam outras que contribuem para tanto. A transformação da tensão alternada em contínua altera a forma da onda senoidal na entrada do retificador. Além disto, o inversor estático não produz uma tensão senoidal, mas apenas um sinal periódico com forte conteúdo harmônico.

Os conceitos teóricos apresentados neste capítulo foram referenciados em diversos autores de livros e artigos de periódicos e na topologia já consagrada de um sistema telefônico, a qual permanece válida também na era das comunicações digitais.

O próximo capítulo apresenta os resultados das pesquisas de campo

realizadas em uma central telefônica de grande porte, contemplando as análises qualitativa e quantitativa.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos nas medições feitas em campo com um osciloscópio e com o analisador de qualidade da energia elétrica, bem como as simulações computacionais realizadas no MATLAB (MATHWORKS, 2011).

A metodologia utilizada para realizar as análises consistiu em monitorar os terminais de saída do sistema de geração própria formado por um Grupo Motor Gerador (GMG) trifásico acionado por motor a óleo diesel em uma central de grande porte de um sistema telefônico em conjunto com a realização de uma simulação computacional. O monitoramento foi realizado em duas fases: a primeira foi constituída por uma análise qualitativa por meio do osciloscópio, enquanto que a segunda foi composta por uma análise quantitativa utilizando um medidor de qualidade de energia elétrica. É importante salientar que as medições foram feitas com o sistema em operação normal, de modo a proporcionar uma ideia exata do comportamento do sistema telefônico, bem como propiciar a coleta dos dados a ser utilizada na simulação computacional.

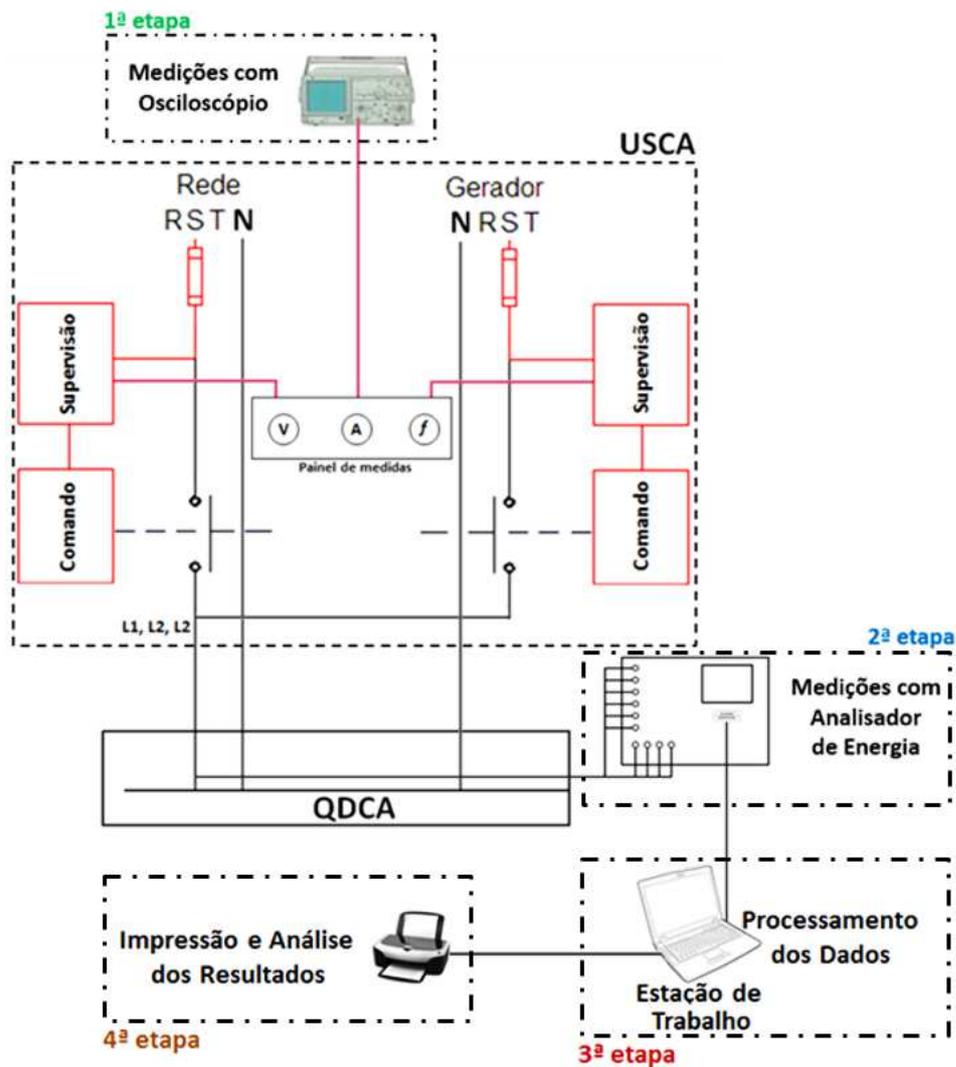
Na Figura 21 é mostrada a sequência das etapas de execução das medições em campo durante o monitoramento. Na primeira etapa, utilizou-se um osciloscópio de dois canais, configurado de forma a permitir a visualização de um período completo e da tensão pico a pico. A conexão da ponta de prova foi feita no próprio painel de medidas da USCA, nos terminais do voltímetro.

Em seguida, utilizou-se um medidor de qualidade da energia elétrica (segunda etapa), com conexão direta no Quadro de Distribuição de Corrente Alternada (QDCA), para registrar as tensões e as correntes trifásicas durante 60 segundos, tempo suficiente para a coleta dos dados relevantes. Após o registro, o analisador foi conectado a um computador portátil para transferência dos dados (terceira etapa) para serem processados com a utilização do aplicativo ANAWIN⁴ (RMS, 2001), o qual permite visualizar graficamente as curvas no domínio do tempo e aos componentes espectrais.

⁴ Aplicativo da RMS Indústria Eletrônica, versão 3.16. 2001, para processamento e apresentação dos dados de tensão e de corrente em interface gráfica, com análises nos domínios do tempo e da frequência.

Na quarta etapa conectou-se o computador a uma impressora para registro gráfico dos dados e criação de arquivos de imagem para efeito de composição do presente trabalho. Ainda nesta etapa foram agrupados os dados de uma dada grandeza elétrica em um mesmo gráfico com o objetivo de comparar o comportamento das diferentes fases, não apenas no domínio do tempo como no domínio da frequência. Obteve-se, assim, um arquivo gráfico para a carga alimentada pela concessionária e outro para a alimentação fornecida pelo GMG.

Figura 21 - Sequência das etapas das medições em campo



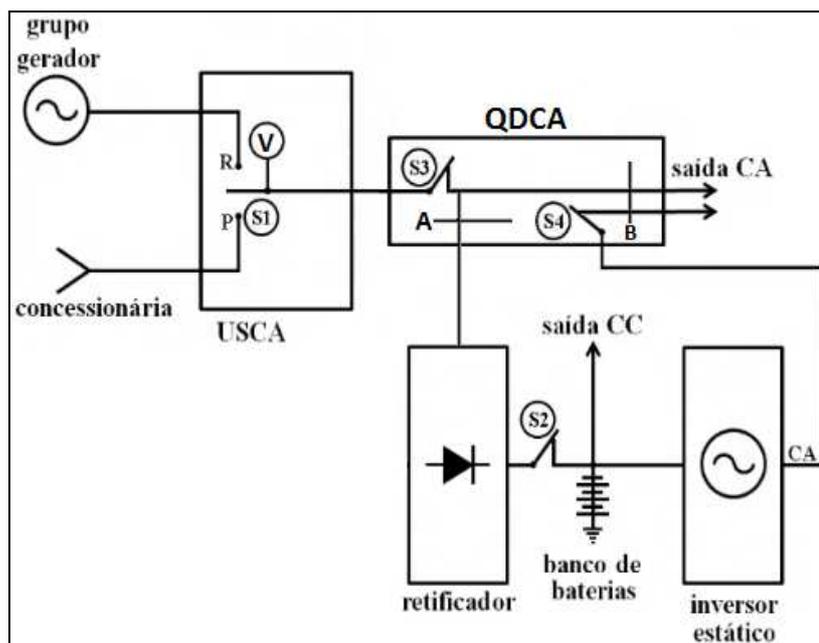
4.1 CONFIGURAÇÃO DO TESTE

A configuração do teste foi selecionada de modo que os instrumentos fossem conectados a uma curta distância do GMG, para que a resistência dos condutores entre os terminais do GMG e os pontos de medição pudesse ser desprezada. Desta forma, a impedância de curto-circuito do gerador não sofreu influência do componente resistivo do cabo de conexão, restringindo-se apenas a impedância do GMG que, para esse estudo, foi considerada somente com sua reatância indutiva.

Como resultado dos testes, espera-se que exista um aumento da distorção harmônica nas tensões quando a carga estiver sendo alimentada pelo GMG, uma vez que a impedância da concessionária vista pela carga é menor. Tal fato pode ser corroborado por meio da potência de curto-circuito proporcionado pela concessionária, que é bem superior em comparação com a obtida com o GMG.

Na Figura 22 é mostrada a topologia simplificada do sistema de energia da central telefônica de grande porte analisada durante este estudo. É factível verificar que somente foram consideradas as cargas essenciais, uma vez que apenas elas são alimentadas pelo grupo gerador.

Figura 22 - Topologia do sistema de energia para as cargas essenciais



É possível observar na Figura 23 que o sistema de suprimento de cargas essenciais pode ser alimentado pela concessionária ou pelo GMG, e é composto pela USCA, pelo retificador, pelo inversor estático e pelo banco de baterias.

Em situações normais de operação, isto é, com o fornecimento da energia pela concessionária, a chave S1 tem o contato transferido para o ponto P, alimentando tanto o retificador como as cargas essenciais (S3 fechada). O retificador, por sua vez, alimentará os equipamentos que operam com CC e manterá as baterias carregadas (chave S2 fechada). Em caso de alguma anormalidade no fornecimento de energia da concessionária, a USCA, equipamento responsável por monitorar os níveis de tensão e de frequência, transferirá o contato da chave S1 para o lado R. Além disso, a chave S4 fica normalmente fechada com o objetivo de assegurar a continuidade de suprimento às cargas sensíveis (como é o caso dos computadores) durante a transição da chave da posição P para a posição S.

É importante destacar que os testes foram executados, inicialmente, considerando a topologia em condições normais, isto é, com as cargas alimentadas pela energia da concessionária. Desta forma, simulou-se uma falta de suprimento da concessionária por meio da comutação da chave S1 para o lado R, mantendo-se as chaves S2, S3 e S4 fechadas, uma vez que suas aberturas ocorrem apenas em caso de necessidade de intervenção nos equipamentos a ela associados, normalmente em ações de manutenção corretiva ou programada.

Após o levantamento das informações em campo, obtiveram-se as especificações do motor e do gerador utilizados na central telefônica estudada, conforme apresentam a Tabela 1 e a Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 - Dados do motor

Cilindros	6
Potência	540 CV
Rotação	1800 rpm
Faixa de temperatura	0°C a 45°C
Regime de potência	Emergência (NBR 14664)

Tabela 2 - Dados do gerador

Fases	3
Potência aparente	420 kVA@gmail.com
Potência ativa	320 kW
Tensões	220/127 V _{RMS}
Conexão	Y, com neutro aterrado
Frequência	60 Hz
Número de polos	4
Corrente nominal	1100
Fator de potência	0,8
Tensão de excitação	136 V _{CC}
Corrente de excitação	25,1 A
Faixa de temperatura	0°C a 45°C

Após o levantamento de dados do GMG, foram iniciadas as análises qualitativa e quantitativa do sistema. Inicialmente, as tensões foram medidas com osciloscópio nos terminais de entrada do voltímetro (indicado com um V) do painel frontal da USCA em função da maior facilidade de acesso, conforme se observa na Tabela 2. É relevante informar que esta unidade de supervisão é de um modelo bastante antigo e, por isso, de difícil acesso a alguns pontos de medição.

O osciloscópio, instrumento que mostra a forma de onda no domínio do tempo, foi utilizado apenas na análise qualitativa da distorção harmônica, visto que este não propicia maiores informações sobre a QEE. O modelo utilizado possui as seguintes especificações:

- Canais: 2, com entradas independentes;
- Frequência de operação: até 100 MHz;
- Atenuação da sonda: x10, linear;
- Sensibilidade do canal: 5 volts/divisão.

Para a análise quantitativa, foi utilizado um analisador de qualidade da energia elétrica, o qual mostra a forma de onda no domínio da frequência, com registros das distorções em componentes harmônicos até a de ordem 25. Estas medições foram feitas no barramento A do quadro geral de distribuição de corrente alternada (QDCA). O modelo possui as seguintes características principais:

- Conexão para medições: trifásica;
- Sondas de tensão: cabos com terminações garra jacaré, até 500 V_{CA} fase-neutro;
- Erro máximo de tensão: 0,2%, entre 100 e 500 V;

- Sondas de corrente: cabos com sensores do tipo alicate amperímetro até 300 A;
- Frequência de amostragem na conversão analógica/digital: 8 kHz;
- Medição de harmônicos: até a 25ª ordem;
- Análise dos dados: *Software ANL6000*.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA

Neste tópico são apresentadas as medidas obtidas com o auxílio do osciloscópio. Embora a análise quantitativa seja mais informativa quanto à distorção harmônica, a análise qualitativa possibilita avaliar o quanto cada forma de onda é deformada pelo seu conteúdo harmônico. Outro aspecto relevante na análise qualitativa está na observação de outras distorções como, por exemplo, ruído periódico decorrente da comutação dos diodos e, eventualmente, de tiristores.

Com a definição do tipo de análise, associada à facilidade de acesso, optou-se por fazer as medições diretamente nos terminais do voltímetro do painel da Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (USCA). Após a instalação do osciloscópio e uma inspeção visual dos painéis, constatou-se que a frequência, tanto da rede da concessionária quanto do grupo gerador apresentou valores na faixa de 60 ± 5 Hz, conforme apresentado pelo freqüencímetro instalado na USCA Figura 23.

Figura 23 - Freqüencímetro da USCA



A verificação da frequência da rede é muito importante, pois desvios em relação ao seu valor de referência podem afetar medições de parâmetros importantes para a qualidade da energia elétrica (MARCHESAN, 2011). Entretanto, os valores mencionados são considerados aceitáveis, uma vez que estão dentro dos limites estabelecidos no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL (2011) e não comprometem o funcionamento das cargas sensíveis à variação de frequência detectada, conforme informações colhidas junto ao corpo técnico da empresa.

Após a realização das conexões, as formas de onda obtidas, com o auxílio do osciloscópio, foram comparadas e verificou-se pouquíssima alteração entre a tensão da concessionária e a do GMG em operação em vazio. Porém, ao se conectar a carga essencial ao GMG, observou-se um aumento na distorção harmônica, quando comparado com o fornecimento provido pela concessionária. A Figura 24 mostra a tela do osciloscópio com a forma de onda da tensão da rede da concessionária operando em vazio, na qual é possível observar uma pequena distorção nos pontos extremos.

Ao se conectar a carga essencial à rede, verificou-se a distorção mostrada na Figura 25 visto que a senóide apresenta alterações próximas aos pontos de máximo e de mínimo.

Figura 24 - Forma de onda da tensão da rede da concessionária, sem carga, com pequena distorção harmônica

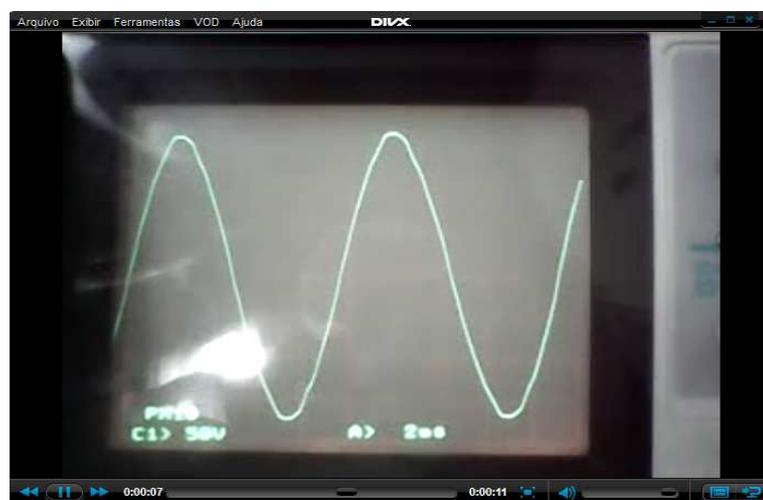
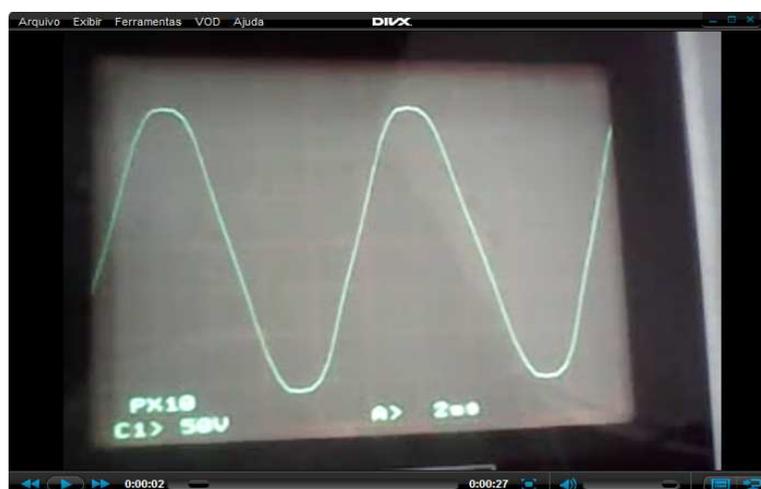


Figura 25 - Forma de onda da tensão da rede da concessionária com carga



A Figura 26 mostra a forma de onda provida pelo GMG operando sem carga, na qual se verifica uma pequena distorção com achatamento dos pontos extremos da senóide.

Figura 26 - Forma de onda da tensão do GMG operando sem carga



Após conectar-se a carga essencial⁵ ao GMG, verificou-se uma forma de onda distorcida por harmônicos, além da presença de ruído periódico, como mostra a Figura 27.

⁵ Define-se *carga essencial* em uma central telefônica como sendo o conjunto dos equipamentos e dependências que devem permanecer constantemente energizados para que não haja risco de comprometer não apenas a continuidade do serviço como a segurança de pessoas.

Figura 27 - Forma de onda da tensão do GMG com carga



Comparando-se as formas de onda da concessionária e do GMG, ambos com carga essencial, verifica-se que o GMG acentua a distorção harmônica, uma vez que a potência do GMG é próxima à da carga e, conseqüentemente, está mais susceptível aos problemas de QEE proporcionados por ela.

Além das medições feitas com o osciloscópio, foram analisadas outras grandezas com o objetivo de verificar outras perturbações causadas pelas distorções harmônicas encontradas, a saber:

- a. Temperatura dos condutores das fases no Quadro de Distribuição Geral Essencial (QGDE);
- b. Corrente elétrica nos condutores das fases no Quadro de Distribuição Geral Essencial (QGDE);
- c. Ruído psfométrico com curva C nos transformadores e indutores do conversor da Fonte Ininterrupta de Energia (FIE), ou *no-break*.

As grandezas supracitadas foram medidas e estão apresentadas na

Tabela 3, conforme as cargas essenciais alimentadas.

As grandezas supracitadas foram medidas e estão apresentadas na Tabela 3, conforme as cargas essenciais alimentadas.

Tabela 3 - Medidas realizadas com cargas essenciais alimentadas pela rede da concessionária e do grupo motor gerador

3a: Medidas com a concessionária			Rede								
			Corrente elétrica (A)			Temperatura (°C)			Ruído (dBA)		
Fases			R	S	T	R	S	T	R	S	T
Condutores	QGDE II, módulo IV	FIE 50 kVA	41	45	50	32,0	31,8	32,0			
Transformadores e indutores	FIE 50 kVA	TR1				58,0			92,0		
		TR2					62,0			93,0	
		TR3						67,0			97,0
		L1						56,0			91,0

3b: Medidas com o GMG			GMG								
			Corrente elétrica (A)			Temperatura (°C)			Ruído (dBA)		
Fases			R	S	T	R	S	T	R	S	T
Condutores	QGDE II, módulo IV	FIE 50 kVA	41	47	52	32,5	33,4	33,4			
Transformadores e indutores	FIE 50 kVA	TR1				58,0			92,0		
		TR2					61,6			93,0	
		TR3						66,1			98,0
		L1						56,8			92,0

Pelos resultados apresentados, é possível verificar que grandezas diretamente relacionadas à distorção harmônica, como o caso das temperaturas dos condutores e do ruído dos transformadores e dos indutores tiveram ligeiro aumento com a carga alimentada pelo GMG.

Após a constatação da presença dos distúrbios nesta análise, foi feita uma consulta preliminar ao banco de dados onde são registrados os indicadores operacionais. Os resultados encontrados demonstraram que as distorções observadas são facilmente absorvidas pelos sistemas implantados para alimentar a central, sem causar qualquer alteração nos valores dos indicadores, segundo informações do corpo técnico da concessionária de telefonia em estudo.

A Tabela 3 mostrou, ainda, a presença de ruído acústico de valor elevado nos transformadores e indutores. Embora não seja o foco deste trabalho, é importante registrar que os níveis de ruído estão acima do estabelecido pela ABNT, que é de 70 decibéis para tempo de exposição até oito horas (NBR 10151, 2000). Já a elevação das temperaturas operacionais dos equipamentos devido à presença de componentes harmônicos, exige uma avaliação quanto à possibilidade de redimensionamento, uma vez que elas fazem aumentar as perdas e reduzem a vida útil (PARENTONI, 2011).

4.3 ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise das medições da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) vem adquirindo sofisticação cada vez maior, devido aos seus impactos e à variedade dos fenômenos associados. Desta forma, as investigações das causas dos problemas relacionados com a QEE não podem se restringir a análise dos valores eficazes das tensões e das correntes (GOLKAR, 2004).

Embora, na maioria dos casos, o monitoramento dos parâmetros de tensão seja suficiente, nesse trabalho foram realizadas medições tanto de tensão quanto de corrente, já que uma central telefônica utiliza grande quantidade de equipamentos com características não lineares e alimentados com corrente contínua (HARRISON, 1999).

Nesse contexto, esta seção irá abordar a análise quantitativa por meio dos resultados obtidos a partir das medições realizadas com um analisador de QEE trifásico e da alimentação do sistema elétrico da central telefônica pela rede da concessionária e pelo GMG, considerando os valores nominais eficazes de 220/127 V_{CA} , tanto para o fornecimento de energia pela concessionária quanto pelo GMG.

Para a análise quantitativa, foi utilizado um analisador trifásico de qualidade da energia elétrica com sondas de tensão e de corrente que permitem a obtenção dos valores eficazes das grandezas elétricas, bem como os componentes harmônicos associados Figura 28.

Figura 28 - Analisador trifásico de qualidade da energia elétrica



A carga escolhida para a realização dos estudos foi o inversor estático (conversor CC – CA) que alimenta as cargas sensíveis às variações de tensão de curta duração (VTCD) presentes em uma central telefônica. Este conversor possui uma corrente nominal de 2400 A e tensão nominal de 48 V_{CC}, o que corresponde a 115,2 kW. Na ocasião da medição, a corrente de consumo era de 61 ampères, correspondendo a 2,9 kW. As conexões foram feitas no lado comum da chave S1 Figura 29, com a chave de transferência de carga conectada ao barramento da concessionária de energia (posição P). Após os registros nesta configuração, a chave de transferência foi comutada para a posição R (barramento do grupo motor gerador).

As sondas de corrente, na forma de alicate amperímetro, foram conectadas diretamente nos condutores Figura 29 enquanto as sondas de tensão, na forma de garra jacaré, foram conectadas diretamente ao barramento trifásico Figura 30. É factível salientar que todas as sondas foram conectadas aos condutores e ao barramento instalados dentro do mesmo cubículo.

O monitoramento com a tensão fornecida pelo GMG ocorreu após a simulação de falta de energia da concessionária. Como normalmente ocorre em simulações desta natureza, ou seja, comutação manual, a carga somente é transferida para o GMG após três minutos de observação das condições da tensão e da frequência do alternador com o intuito de assegurar boas condições de fornecimento de energia pelo sistema de geração própria.

Figura 29 - Conexões das sondas de corrente na forma de alicate amperímetro



Figura 30 - Conexões das sondas de tensão na forma de garra jacaré.



Alguns afundamentos de tensão podem ocorrer durante milissegundos, o que exige monitoramento contínuo do sistema (GOLKAR, 2002). Entretanto, o barramento do QDCA essencial foi monitorado durante apenas 60 segundos visto que o objetivo foi analisar os componentes harmônicos. Os dados foram armazenados no próprio analisador, transferidos para um computador portátil para posterior análise.

Após a coleta dos dados, as análises das informações foram feitas com auxílio do aplicativo ANAWIN e contemplaram os componentes harmônicos somente até a de ordem 25, visto que as de ordem mais elevada apresentam valores desprezíveis.

Não apenas com a concessionária, mas também com o GMG, foram registradas presenças dos harmônicos pares, o que se deve à ligeira assimetria das formas de ondas das tensões e das correntes.

4.4 ANÁLISE DAS TENSÕES

A referência para a análise das tensões da rede foi a Tabela 4, a qual mostra os limites de Distorção Harmônica Individual de Tensão definidos no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional da ANEEL (ANEEL, 2011).

Tabela 4 - Distorções Harmônicas Individuais de Tensão – DHIT (%)

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

Fonte: ANEEL (2011).

Comparando-se os resultados obtidos em campo com os valores da Tabela 4, verifica-se que a distorção para cada componente harmônica está dentro do especificado.

A partir dos resultados obtidos nas medições de tensão Tabela 4, foi verificado que não houve variação considerável na distorção harmônica total (DHT) em função do tipo de suprimento, ou seja, quando se compara a tensão fornecida pela concessionária com a do GMG. Como já esperado, os harmônicos de ordem mais elevada apresentaram amplitudes muito pequenas, comparativamente à da

frequência fundamental. A presença dos harmônicos pares se deve ao fato de que não há total simetria nas formas de onda. A maior distorção das tensões encontradas ocorreu na fase **C**, com 4,35 V de pico, o que correspondeu a 2,37% para a quinta harmônica. Em todas as fases da FIE alimentada pela concessionária a maior distorção verificou-se na quinta harmônica. A terceira harmônica não apresentou distorção sequer igual a 1% em todas as fases.

Figura 31 - Diagrama de tensão da fase A do QDCA alimentado pela rede da concessionária

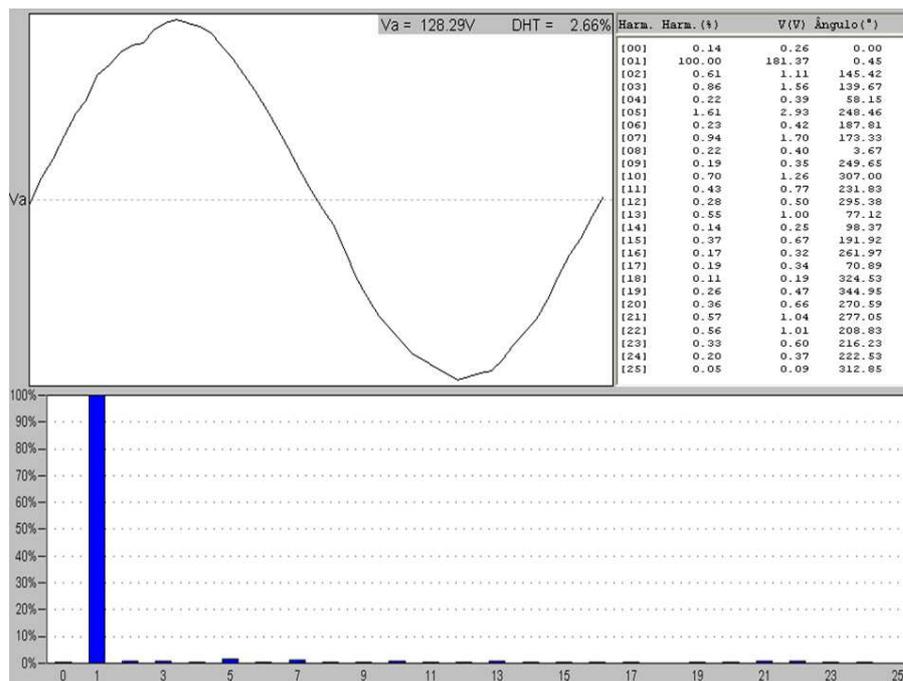


Figura 32 - Diagrama de tensão da fase B do QDCA alimentado pela rede da concessionária

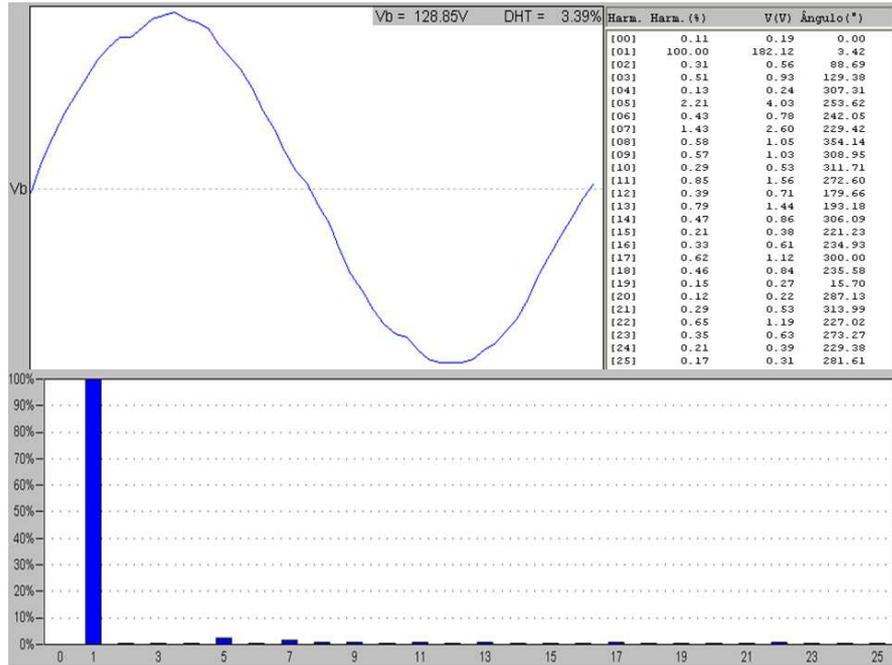
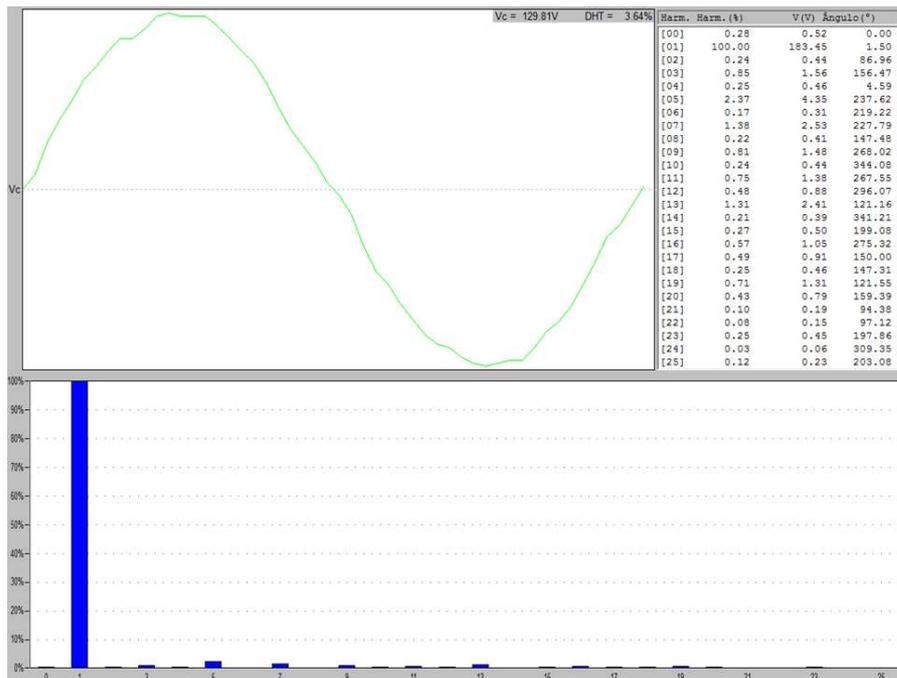


Figura 33 - Diagrama de tensão da fase C do QDCA alimentado pela rede da concessionária



Quanto ao GMG, os resultados encontrados e mostrados na Figura 34 a Figura 36, confirmaram a existência de distorção superior àquela encontrada para a alimentação pela concessionária de energia, conforme análise qualitativa feita com o osciloscópio. Desta vez, a terceira harmônica da fase **B** foi a ofensora na geração da distorção, registrando-se a tensão de 13,85 V de pico, correspondendo a 7,65%. Em todas as fases, a quinta harmônica foi, também, a que mais contribuiu para a distorção harmônica total, a exemplo do que ocorreu com a carga alimentada pela rede da concessionária.

Este fato evidencia que a FIE é a principal responsável pela geração da quinta harmônica, inclusive sendo esta superior à terceira harmônica. Além disso, é factível salientar que as distorções totais nas três fases do GMG estão acima do especificado, que é de 3% para grupos geradores para telecomunicações (NBR 14664, 2001).

A análise das tensões tornou evidente que o grupo gerador faz com que o barramento de cargas essenciais apresente maior distorção harmônica do que quando o mesmo barramento é alimentado pela rede da concessionária de energia.

Figura 34 - Diagrama de tensão da fase A do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador

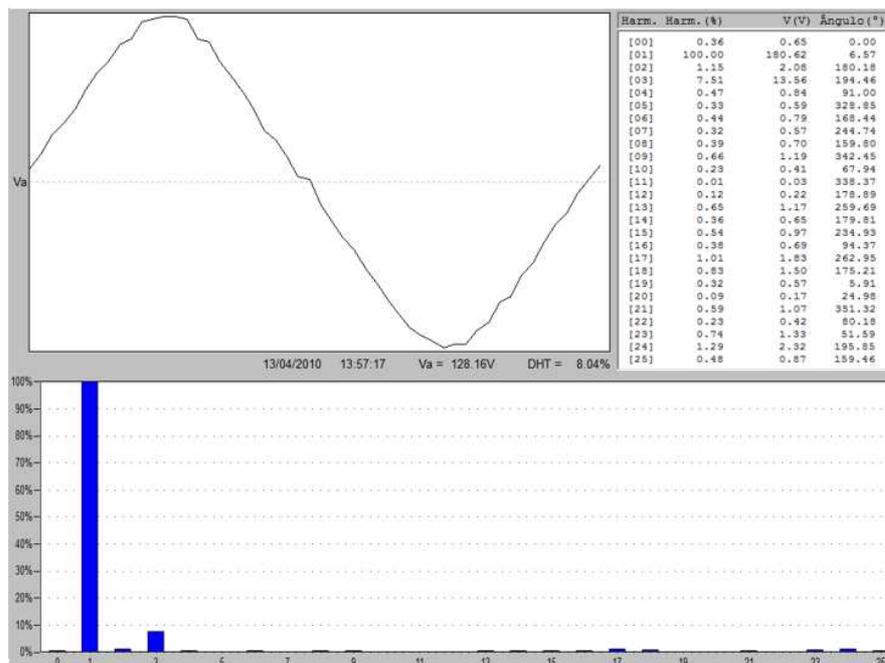
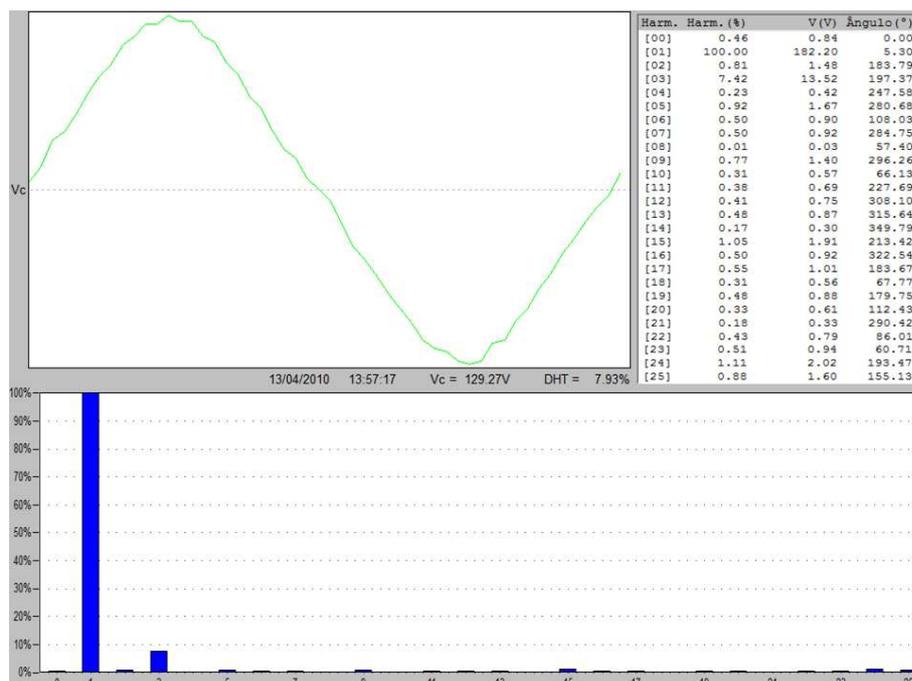


Figura 35 - Diagrama de tensão da fase B do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador



Figura 36 - Diagrama de tensão da fase C do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador



4.5 ANÁLISE DAS CORRENTES

Na análise quantitativa das correntes, cujos percentuais utilizaram como base a corrente nominal do componente fundamental, percebe-se que, mais uma vez, a quinta harmônica teve participação preponderante na distorção harmônica total, não apenas quando a FIE foi alimentada pela concessionária como quando pelo grupo gerador. Mais uma vez, os harmônicos de ordem mais elevada apresentaram pequenas amplitudes. Verificou-se, também, a presença dos harmônicos pares, já que não há total simetria nas formas de onda de corrente.

Por se tratar de um sistema desequilibrado, visto que tanto a concessionária quanto o GMG alimentam outras cargas além da FIE, as fases apresentaram consumos e distorções diferentes. Neste aspecto, a fase **B** apresentou distorção superior às outras duas, em ambas as condições de suprimento. Para a da concessionária Figura 37 a Figura 39, a distorção da fase **B** para a quinta harmônica foi de 25,58 ampères de pico, correspondendo a 41,95%, para uma DHT de 51,74% (48,58 ampères).

Figura 37 - Diagrama de corrente da fase A do QDCA alimentado pela concessionária

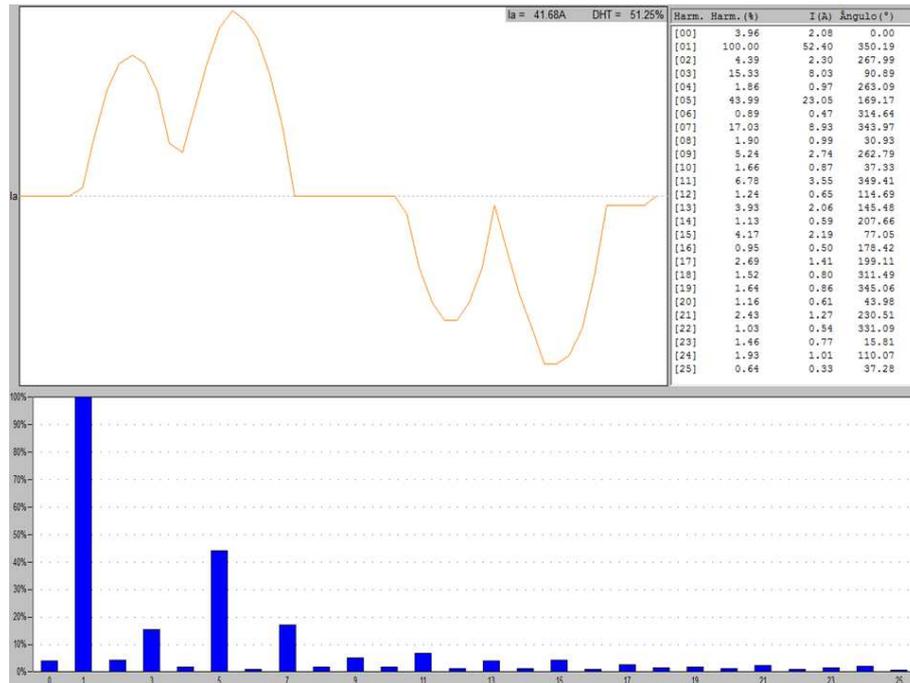


Figura 38 - Diagrama de corrente da fase B do QDCA alimentado pela concessionária

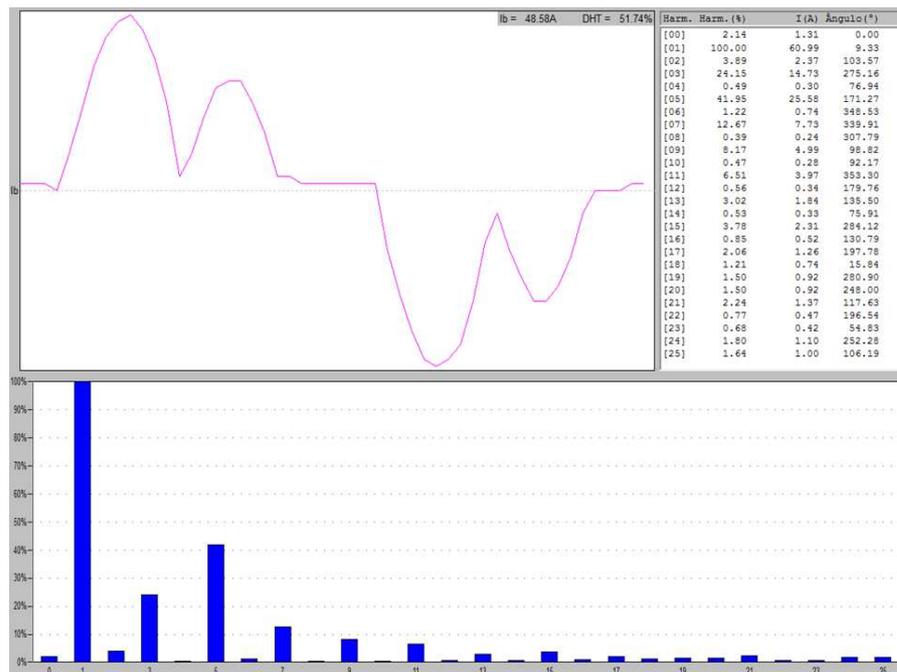
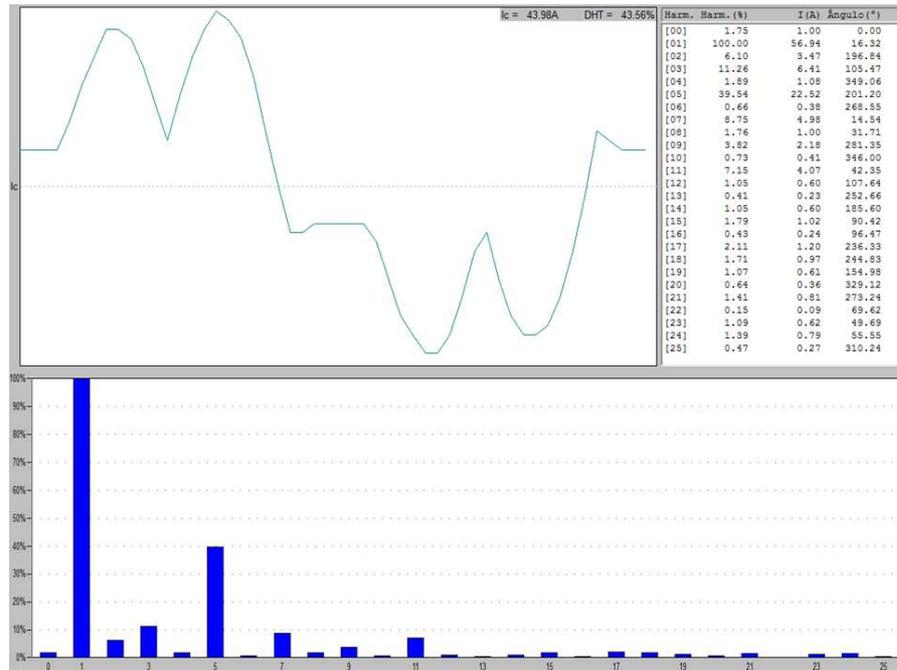


Figura 39 - Diagrama de corrente da fase C do QDCA alimentado pela concessionária



Para a fonte do grupo motor gerador, a quinta harmônica apresentou distorção de 26,11 ampères de pico, na fase **B**, correspondendo a 43,83% Figura 40 a Figura 42. Nesta mesma fase, a DHT foi de 55,47% (48,19 ampères).

Figura 40 - Diagrama de corrente da fase A do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador

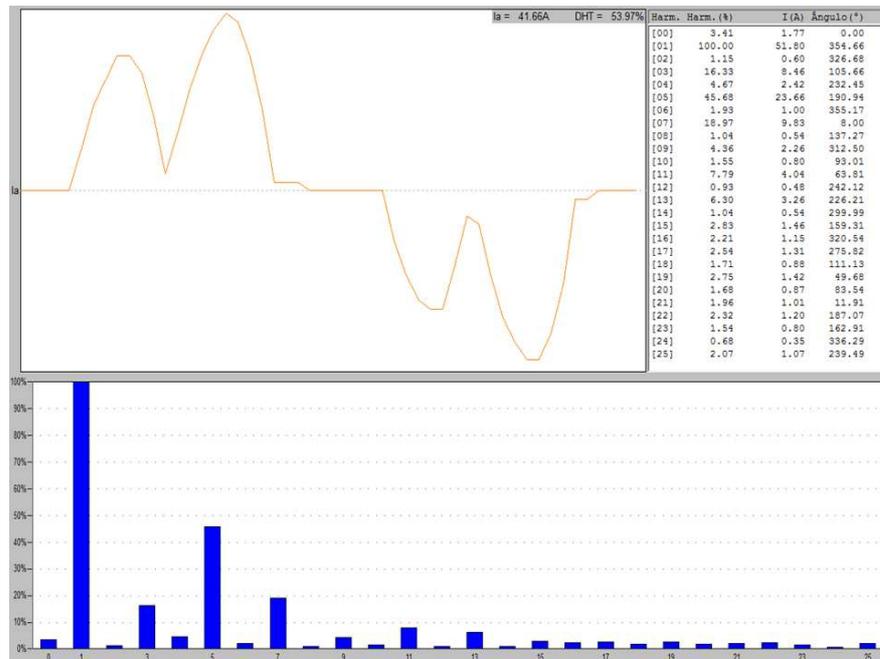


Figura 41 - Diagrama de corrente da fase B do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador

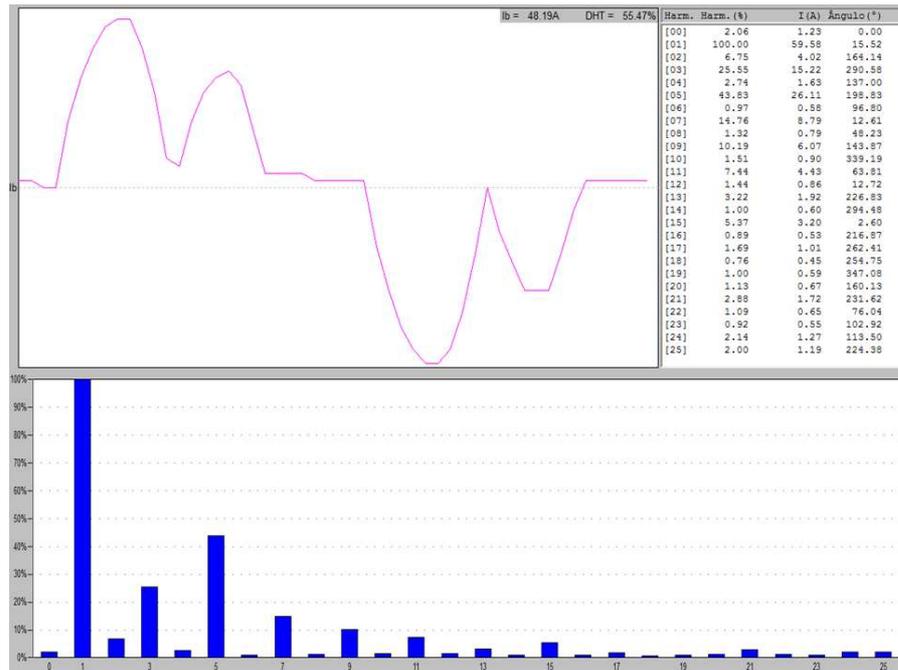
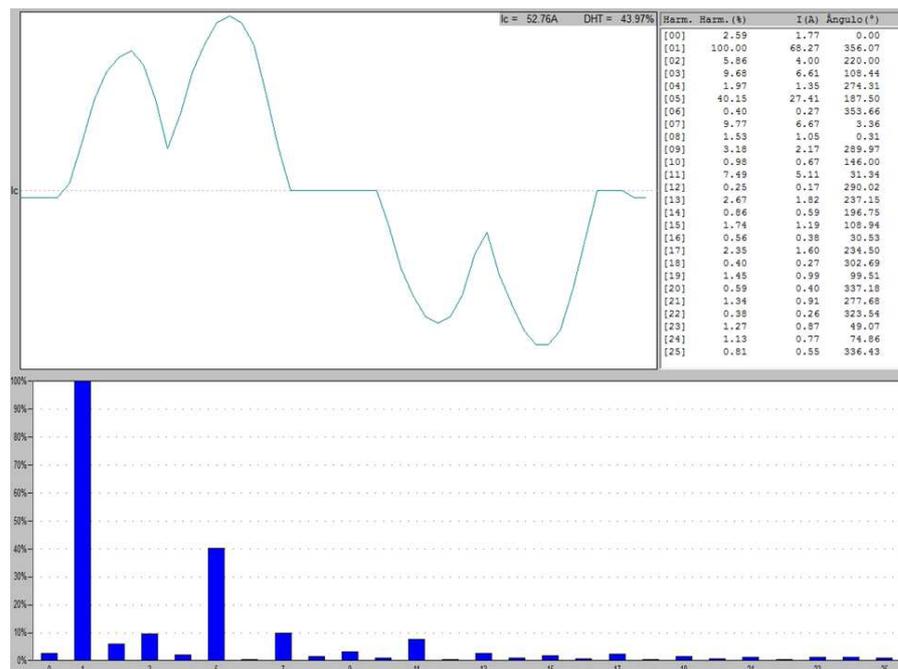


Figura 42 - Diagrama de corrente da fase C do QDCA alimentado pelo grupo motor gerador



Considerando-se que a distorção média de todas as correntes foi superior a 50%, um estudo sobre a instalação de dispositivo de atenuação foi desenvolvido, conforme pode ser observado no tópico referente à simulação computacional. Outro fato a ser verificado é que as tensões do GMG tiveram seus valores acima do especificado pela ABNT.

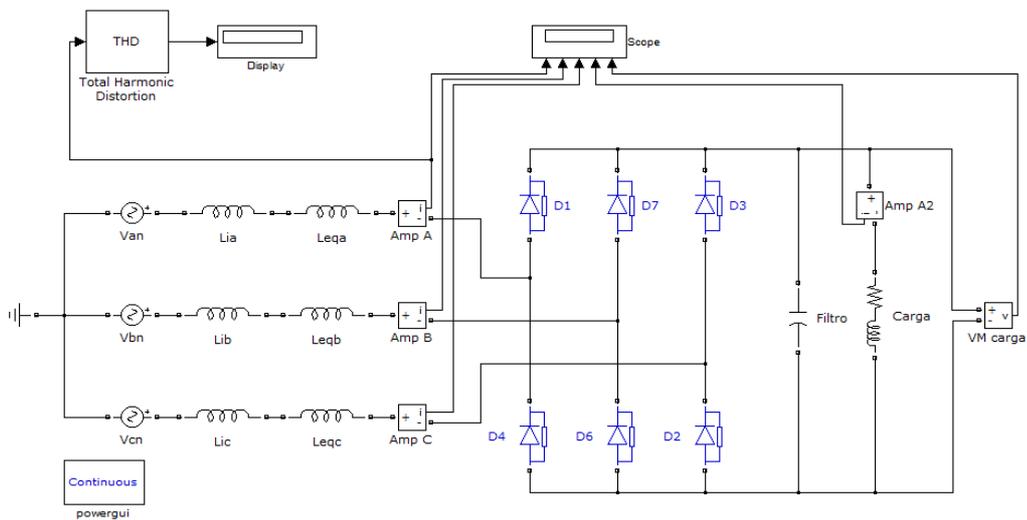
4.6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com o objetivo de melhorar as análises das distorções harmônicas observadas na central telefônica, bem como verificar possíveis soluções mitigadoras, diversas simulações foram feitas com a utilização do aplicativo MATLAB (THE MATHWORKS, 2011).

Inicialmente, as simulações consideravam cada subsistema isoladamente com o objetivo de verificar a influência de cada parte do sistema. Desta forma, o GMG foi simulado em conjunto com o retificador, e a fonte de tensão contínua com o inversor. Após a verificação individual de cada unidade, o sistema interligado.

A Figura 43 representa o circuito da modelagem do sistema elétrico composto pelo GMG e pelo retificador no *Simulink*. É possível verificar que as indutâncias em série de cada fase representam as internas do GMG (L_i) e as equivalentes de todo o circuito entre a ponte retificadora (L_{eq}), respectivamente. O retificador utilizado é formado por uma ponte trifásica de diodos com seis pulsos, cuja sequência de disparo foi estabelecida conforme indicação do fabricante.

Figura 43 - Modelo do sistema para o GMG com o retificador

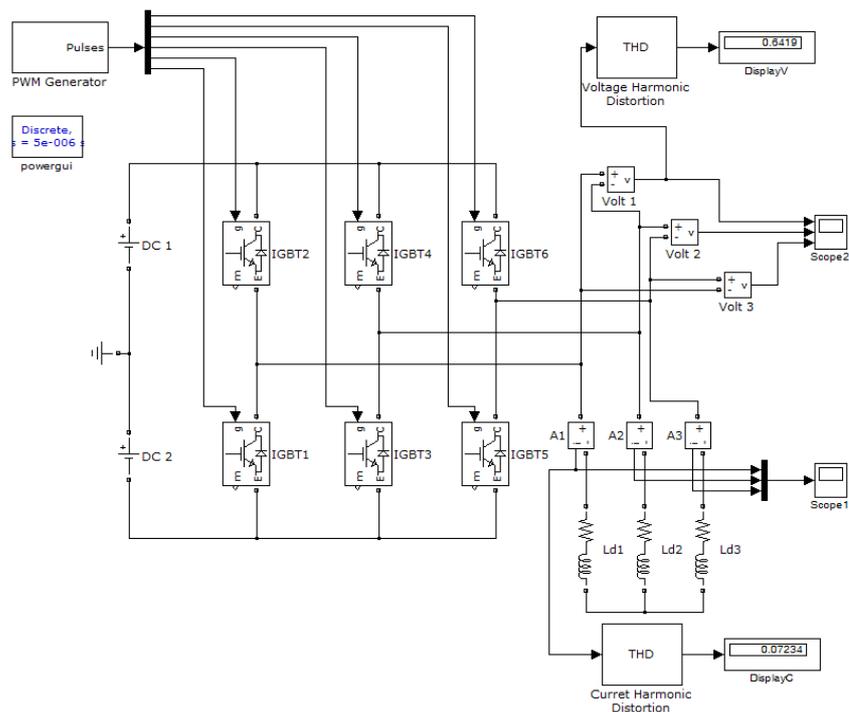


Além dos dispositivos supracitados, o modelo inclui um bloco DHT, que realiza a amostragem da corrente e a análise da distorção harmônica total. Apresenta, também, o resultado numérico no visor, um filtro LC na saída do retificador com valores elevados de indutância e de capacitância para reduzir a

ondulação a valores da ordem de 1%. Utilizou-se, ainda, um osciloscópio com cinco canais para permitir monitoramento das correntes nos pontos onde foram feitas as medições com o analisador de energia e os valores da corrente e da tensão sobre a carga.

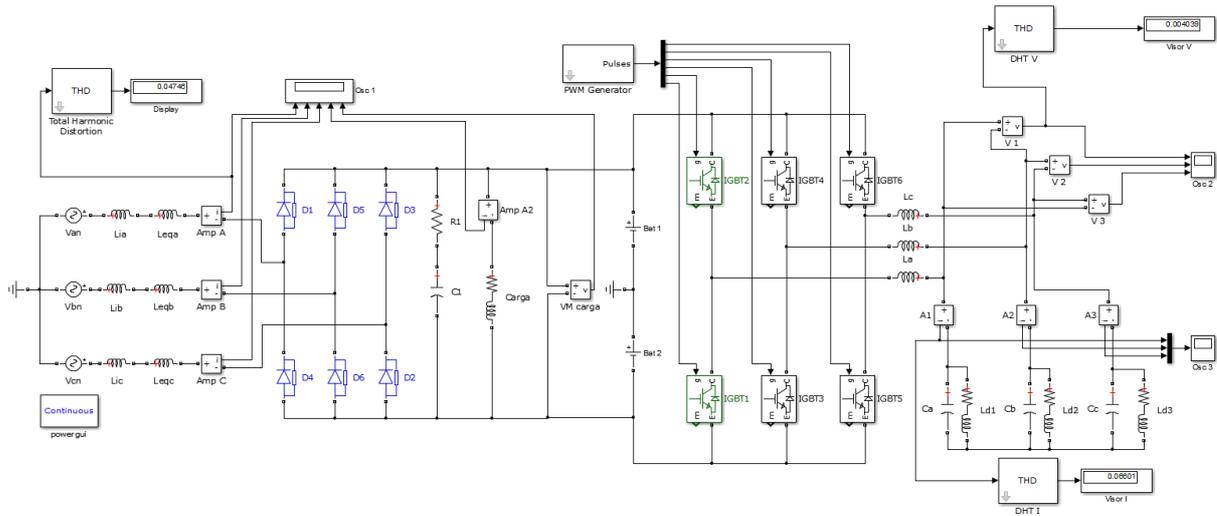
Após a simulação do sistema retificador, o sistema de inversão foi modelado com o intuito de representar a fonte de tensão contínua de 48 volts provida pelo banco de baterias, conforme tipicamente encontrado em sistemas telefônicos. Além disso, os elementos de comutação formados pelos transistores de potência com porta isolada (IGBT), cujos disparos são feitos por um modulador por largura de pulsos (PWM) com seis saídas e frequência de referência de 420 Hz, foram simulados. A Figura 44 mostra o modelo confeccionado no Simulink em conjunto com um bloco de carga.

Figura 44 - Modelo do sistema para a fonte de tensão contínua com o inversor



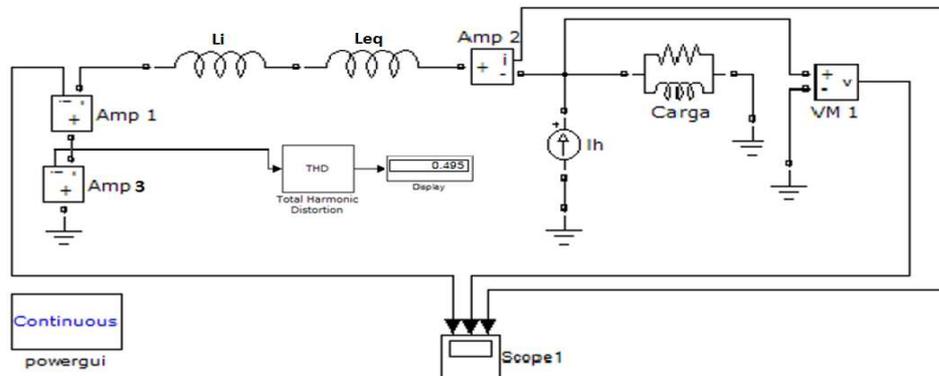
Com a conclusão da modelagem individual dos subsistemas, estes foram integrados em uma única simulação com o objetivo de verificar as características de interação entre eles. Desta forma, a Figura 45 mostra o circuito equivalente geral da geração própria simulado no MATLAB.

Figura 45 - Modelo do sistema de geração própria



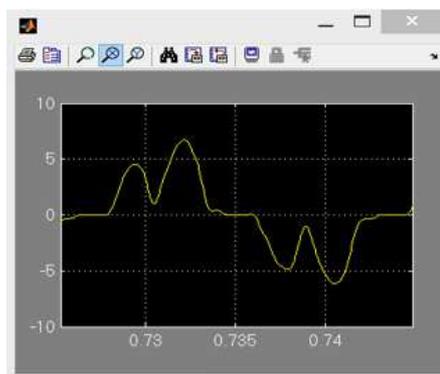
De posse do modelo completo do sistema de geração própria e das análises das medições realizadas em campo, outra modelagem simplificada por meio do circuito equivalente de Norton foi executada, conforme ilustra a Figura 46.

Figura 46 - Circuito equivalente de Norton

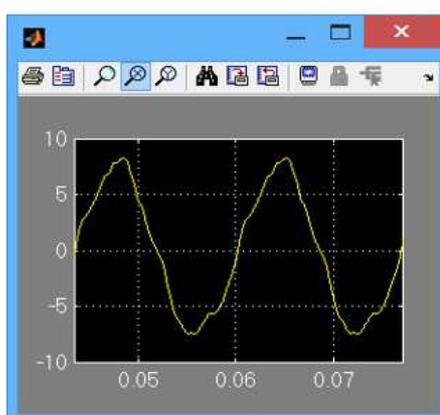


Este modelo simplificado teve como objetivo principal simular as formas de onda da corrente e da tensão mensuradas no barramento do GMG, como mostram as Figuras 47a e 47b. É factível verificar que estas figuras são bastante parecidas com as que foram mostradas nas Figuras 34 e 40. Por simplicidade, a fase **A** do GMG foi tomada como referência para a modelagem, uma vez que a forma de onda observada e a distorção harmônica total obtida foram próximos aos valores registrados nas medições em campo, muito embora seja possível obter-se DHT iguais com componentes harmônicos diferentes.

Figura 47 - Formas de onda obtidas na simulação com MATLAB



47a: Forma de onda de corrente



47b: Forma de onda de tensão

4.6.1 Modelagem alternativa

Com a validação do modelo elaborado com elementos discretos do Simulink, um novo modelo foi realizado utilizando os blocos do *SimPowerSystem*, uma vez que esta caixa de ferramentas (*toolbox*) é capaz de representar com precisão o sistema de geração própria, bem como outros componentes de um sistema elétrico de potência.

Entretanto, antes da apresentação do modelo, torna-se necessário estabelecer algumas premissas, tendo em vista que as características de um sistema real diferem de um modelo computacional, principalmente no que diz respeito às impedâncias utilizadas na simulação, já que os valores exatos utilizados no equipamento não puderam ser obtidos, pois se trata de um equipamento antigo e os administradores da central não dispõem das informações.

As premissas adotadas para a realização das simulações foram:

- a. Priorizar as formas das correntes, uma vez que estas proporcionam um

maior impacto em uma central telefônica;

- b. Adotar a frequência do oscilador mestre do PWM em 25 vezes a frequência da rede com o objetivo de reduzir a distorção da tensão alternada fornecida pela FIE, muito embora duas vezes a frequência do sinal amostrado fosse suficiente, pelo Teorema de Nyquist⁶;
- c. Adotar os valores das grandezas elétricas do modelo de modo a se obter as formas de ondas mais próximas das obtidas nas medições em campo, a exemplo do que ocorreu com o modelo baseado no Teorema de Norton e
- d. Adotar a fase **B** como referência, por ser a que apresentou maiores distorções.

É factível mencionar que o sistema de geração própria estudado não é equilibrado, tendo em vista que existem diversas cargas monofásicas de diferentes impedâncias que integram o quadro essencial.

Após a simulação, foram obtidos os valores mostrados na Tabela 5, juntamente com os valores medidos em campo.

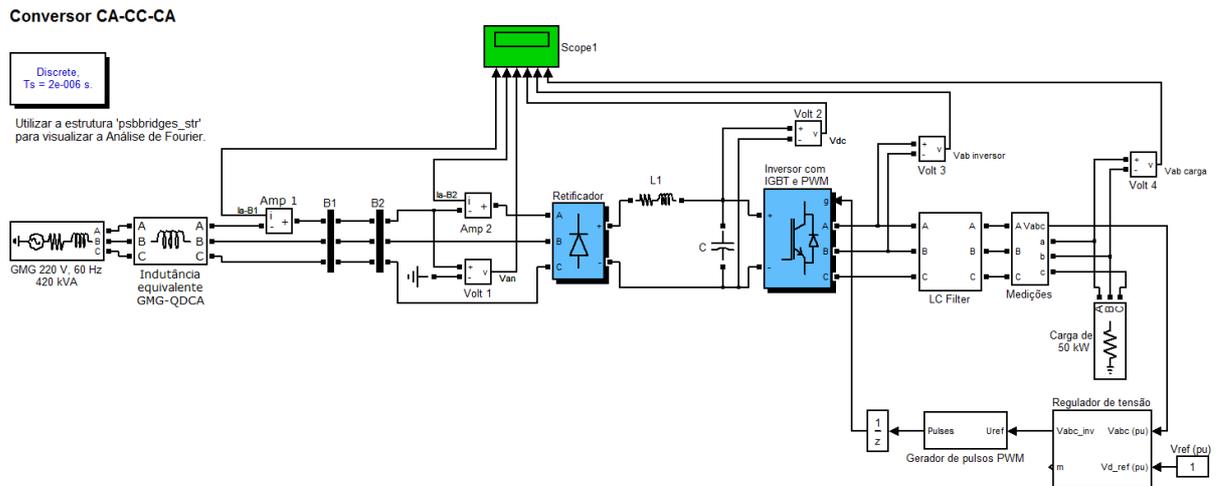
Tabela 5 - Quadro comparativo entre as distorções percentuais da fase **B** do GMG

	Medição em campo	Simulação	Varição
Tensão	8,23%	8,09%	- 1,7%
Corrente	55,47%	54,30%	- 2,2%

Outro aspecto importante a ser salientado é que a modelagem foi focada na distorção harmônica das correntes, pelo fato de que elas circulam pelas diversas cargas essenciais e pelo próprio alternador, afetando as cargas como um todo. Além disso, tais correntes circularão pelos diversos condutores da central telefônica, podendo gerar campos magnéticos capazes de produzir interferência nos equipamentos. Assim, as grandezas elétricas tiveram seus valores adotados para reproduzir, da melhor forma possível, as formas de ondas obtidas nas medições em campo. Na Figura 48 é mostrado o diagrama da simulação alternativa, cujos parâmetros mais relevantes estão descritos a seguir.

⁶ O Teorema de Nyquist estabelece que, para que um sinal digitalizado possa ser recuperado com 98% de inteligibilidade, a frequência de amostragem do sinal original deve ser, pelo menos, duas vezes a maior frequência contida no sinal amostrado.

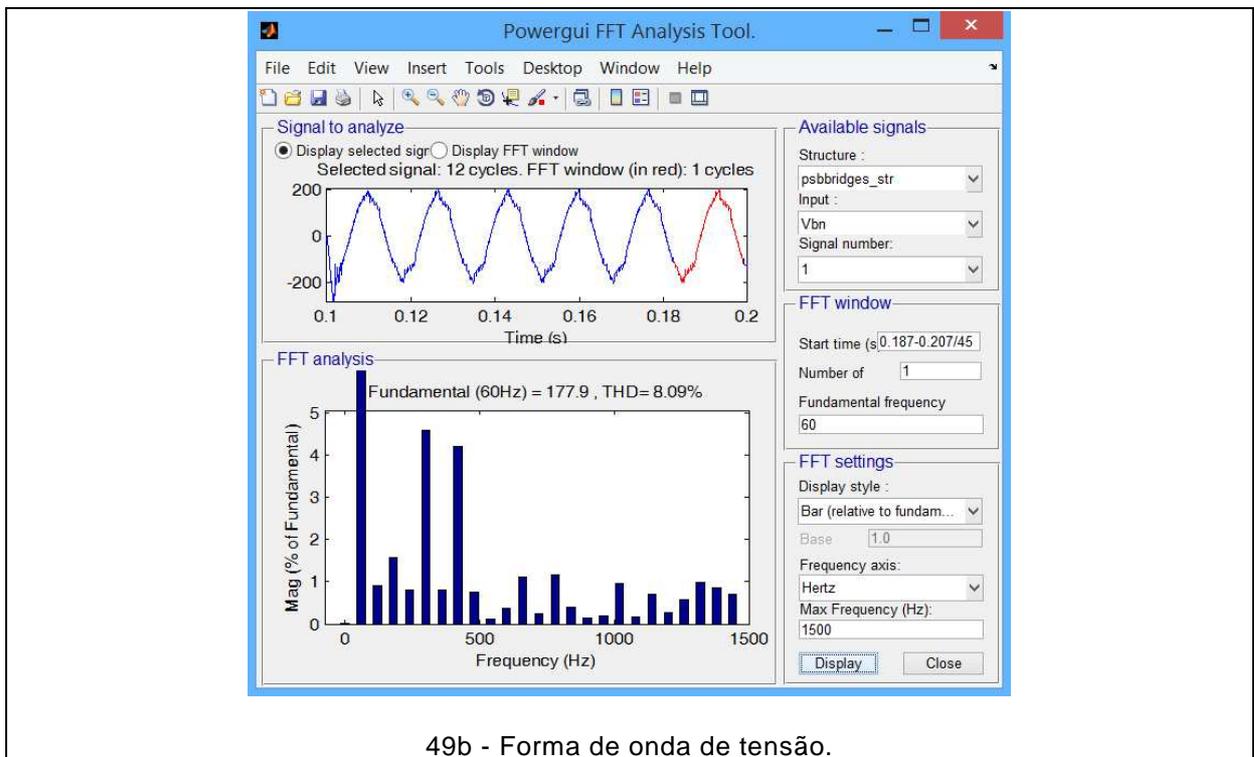
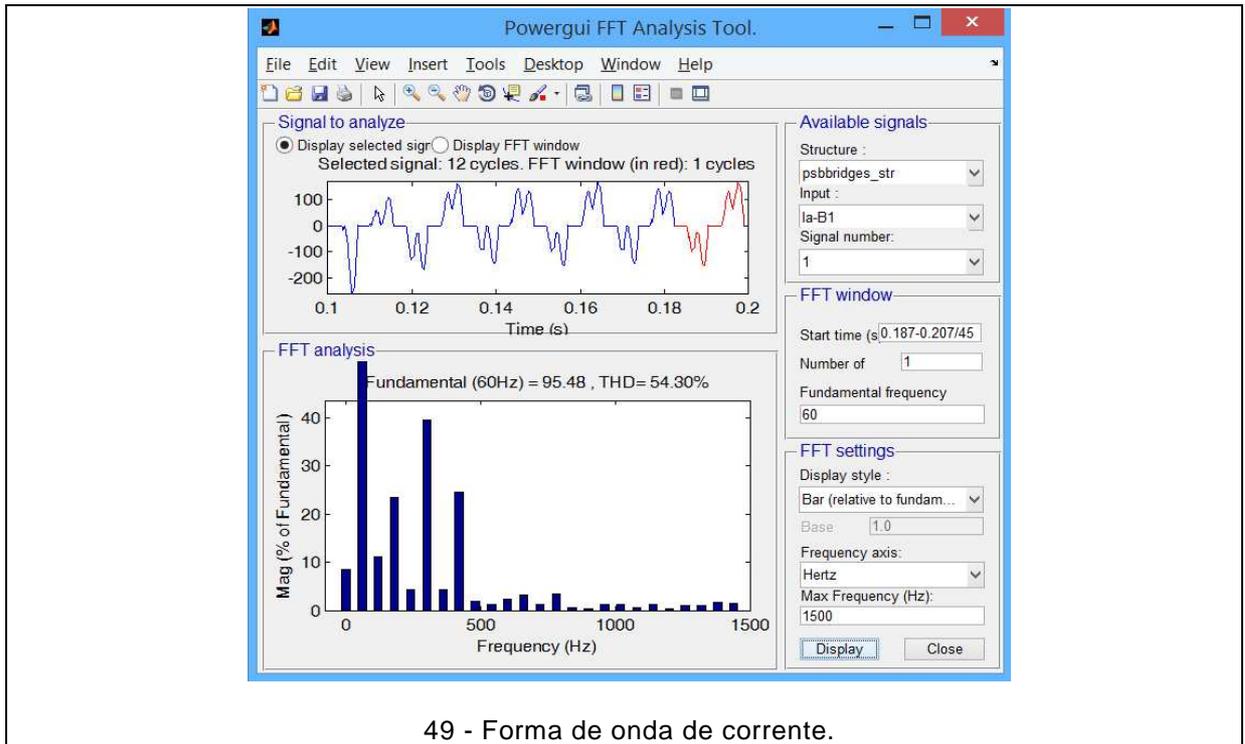
Figura 48 - Simulação alternativa com Simulink



Como pode ser observado na Figura 48, o retificador utilizado é do tipo trifásico com seis diodos retificadores não controlados, visto que as centrais telefônicas utilizam essa topologia para a retificação de tensões que alimentam os equipamentos que operam com corrente contínua. Já o inversor utiliza Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBT, do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistors*) com acionamento por meio da modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse-Width Modulation*), cuja frequência de chaveamento foi definida em 1500 Hz, para este trabalho.

Adicionalmente aos blocos supracitados, um circuito LC entre o retificador e o inversor foi inserido com o objetivo de filtrar os componentes de alta frequência do sinal retificado, e seus parâmetros foram determinados para a reprodução correta das formas de onda das correntes. Desta maneira, adotaram-se os valores de $R = 0,1 \Omega$, $L = 56 \mu\text{H}$ e $C = 1500 \mu\text{F}$, para obter as formas de onda mostradas na Figura 49.

Figura 49 - Formas de ondas de corrente e de tensão com a simulação alternativa em *Simulink*



Um aspecto importante a ser observado é que a carga foi estimada em 50 kW por meio de sucessivas simulações, de modo que a curva observada e a DHT fossem as mais próximas possíveis do cenário encontrado nas medições.

4.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises das medições feitas no sistema de geração própria de uma concessionária de serviço telefônico de grande porte. Inicialmente, foram analisadas as medidas do ponto de vista qualitativo. Em seguida, foi feita a análise quantitativa dos componentes harmônicos encontradas. Finalmente, foram feitas simulações computacionais com o aplicativo MATLAB, com o objetivo de obter-se uma referência para as propostas que serão apresentadas no próximo capítulo. Um dos modelos foi baseado no Teorema de Norton e outro utilizou dispositivos interligados priorizando a obtenção das formas de ondas mais próximas possível das obtidas com as medições em campo.

5 MEDIDAS MITIGADORAS SUGERIDAS

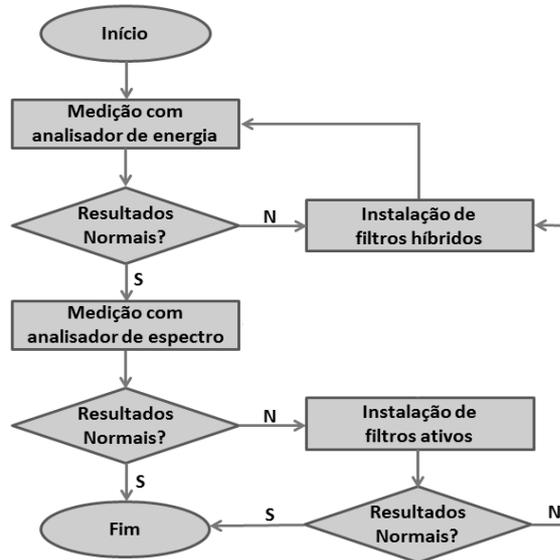
As distorções harmônicas de tensão foram encontradas fora dos limites determinados pelas normas na rede elétrica de uma central telefônica com o GMG em carga. Diante deste problema, são apresentadas sugestões para o aprofundamento dos estudos, considerando que as distorções tendem a aumentar com o crescimento das cargas não lineares, bem como propostas para redução das distorções encontradas.

Propõe-se que o aprofundamento dos estudos consista em:

- a) Efetuar levantamento de todas as variáveis envolvidas, bem como dos equipamentos geradores de distorção harmônica da central telefônica, incluindo-se o próprio GMG;
- b) Catalogar todas as cargas sensíveis à presença de componentes harmônicos, tais como: transformadores; cabos de alimentação; capacitores para correção de fator de potência; equipamentos eletrônicos com acoplamentos indutivos e capacitivos; aparelhos de medição com disco de indução; relés de proteção e fusíveis (transientes oscilatórios em altas, médias e altas frequências) (IEEE PSRC, 2000);
- c) Efetuar levantamento das cargas não lineares, as quais representam um elemento preponderante na geração de distorção harmônica;
- d) Efetuar medições com um analisador de espectro para investigar se os componentes harmônicos contidos no transiente durante a comutação da chave S1 e no estado permanente poderão interferir no gerador de base de tempo dos circuitos digitais da central;
- e) Implantar na saída do inversor estático filtro híbrido sintonizado de modo a rejeitar frequências próximas à do gerador de base de tempo. Alternativamente, pode-se optar por um filtro ativo convencional compensado por capacitores por ser de custo inferior (FERREIRA *et al.*, 2013);
- f) Monitorar continuamente os indicadores de QEE e de telefonia para verificar eventuais correlações, conforme procedimento operacional mostrado no fluxograma da Figura 50. A periodicidade do monitoramento dependerá da curva de variação da corrente, porém recomenda-se que seja feita sempre que houver instalação de novo conversor CA-CA, por ser o principal gerador

de distorção harmônica.

Figura 50 - Fluxograma do procedimento operacional sugerido para acompanhamento das distorções



5.1 PROPOSTAS DE AÇÕES MITIGADORAS PARA REDUZIR A DISTORÇÃO

Várias técnicas para redução da distorção harmônica são conhecidas e aplicadas, e que podem ser agrupadas em quatro partes (ADDOWEESH *et al.*, 2003):

- a. Filtros harmônicos passivos;
- b. Filtros harmônicos ativos;
- c. Filtros harmônicos híbridos e
- d. Técnicas de comutação.

5.1.1 Filtros passivos

Os filtros passivos estão entre os mais antigos dispositivos utilizados na redução da distorção harmônica, porém ainda utilizados amplamente. Utilizam elementos passivos como resistores, capacitores e indutores. São considerados mais adequados em sistemas trifásicos com quatro fios, mas possuem a

desvantagem de utilizarem capacitores e indutores com pesos e custos elevados (IRWIN; WILAMOWSKI, 1997). Os filtros passivos podem ser instalados em série ou em paralelo.

Os filtros em série são formados por capacitor e indutor em paralelo entre si e em série com a carga e com a fonte. São mais indicados em circuitos monofásicos, principalmente na atenuação da terceira harmônica. Apresentam a vantagem de baixo custo de manutenção, porém eles devem ser dimensionados para a corrente total consumida pela carga, o que pode acarretar em custos mais elevados (ADDOWEESH *et al.*, 2003).

Os filtros em paralelo oferecem bons resultados na filtragem dos harmônicos ímpares, principalmente as de ordem três, cinco e sete. Apresentam como principal vantagem o fato de conduzirem apenas as correntes harmônicas para as quais foram dimensionados, porém o projeto se torna mais complexo na medida em que a ordem da harmônica se eleva. Os mais empregados são os de primeira, segunda, terceira ordens e do tipo C.

5.1.1.1 Filtros sintonizados

Como uma proposta de solução, inseriu-se um conjunto com cinco filtros passivos, cada um sintonizado em componentes de ordem ímpar, da terceira à décima primeira. Na Figura 51 é mostrado o circuito equivalente de Norton para o sistema. Nos cálculos dos valores dos componentes, optou-se por manter fixo o valor da capacitância com um valor comercial, variando-se as indutâncias, conforme a Tabela 6, aplicando-se a fórmula:

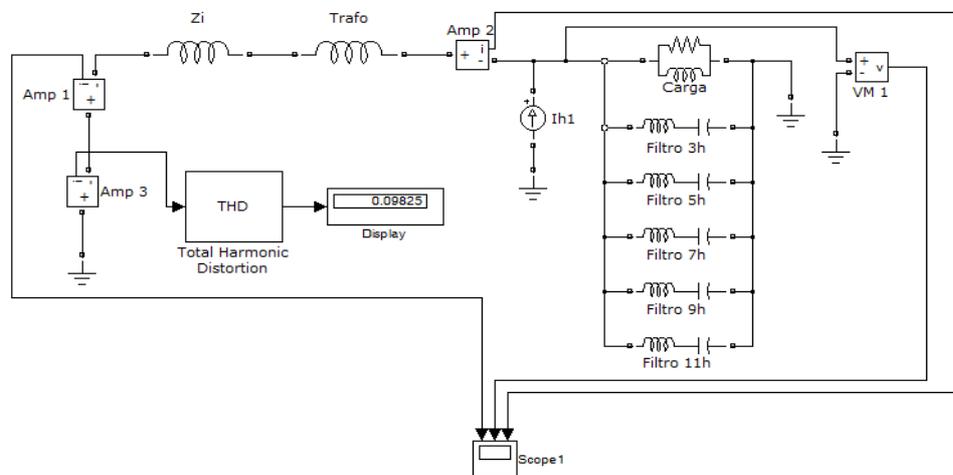
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Tabela 6 - Valores do capacitor e dos indutores do modelo.

$f_0 = 60\text{Hz}$	C	L
Filtro 3h	0,000384	0,002036
Filtro 5h	0,000384	0,000733
Filtro 7h	0,000384	0,000374
Filtro 9h	0,000384	0,000226
Filtro 11h	0,000384	0,000151

Considerando-se que os valores dos indutores não são comerciais, deverão ser adquiridos sob encomenda.

Figura 51 - Modelo para o GMG, com inserção do filtro



Os filtros propostos são de baixo fator de qualidade⁷, o que poderá afetar o valor da corrente de saída, porém são de baixo custo. Alternativamente, pode-se optar por valores mais elevados de capacitância, o que elevaria consideravelmente o custo. Portanto, as alternativas de filtro ativo e de inversor multiníveis devem ser consideradas em uma análise técnico-econômica.

Os filtros sintonizados apresentam o inconveniente de entrarem em ressonância para determinada frequência, o que provoca aumento da corrente e, conseqüentemente, aquecimento nos elementos do circuito. Assim, costuma-se instalar filtros dessintonizados com o intuito de evitar a ressonância nas frequências harmônicas e compensar variações de frequências na rede.

⁷ Define-se *fator de qualidade* de um filtro como a relação entre a frequência de ressonância e a largura de faixa. Em termos práticos, quanto maior o fator de qualidade, mais seletivo será o filtro, ou seja, mais estreito será, relativamente ao valor da frequência de ressonância.

5.1.1.2 Filtros dessintonizados

Este tipo de filtro consiste em inserir um reator em série com o capacitor sintonizado em uma frequência ligeiramente inferior. Essa diferença na frequência ressonante produz um desvio denominado fator de dissintonia (δ), que nesta análise, o fator utilizado foi de 5,7%. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos através de processo iterativo com auxílio da planilha Excel. A primeira coluna representa os harmônicos ímpares, até o décimo primeiro.

Tabela 7 - Valores do capacitor e dos indutores do modelo dessintonizado

f_0	C	L	δ	Q	f
180	0,000018	0,04700	5,7	51	173
300	0,000018	0,01800	5,7	32	280
420	0,000018	0,00900	5,7	22	395
540	0,000018	0,00560	5,7	18	501
660	0,000018	0,00370	5,7	14	617

O fator de qualidade calculado para essa categoria de filtro apresentou valores bem mais elevados do que nos filtros sintonizados, porém somente para os componentes harmônicos de terceira e quinta ordens os valores do fator de qualidade foram superiores a 30, considerado satisfatório. Não obstante, os valores de capacitância e de indutância para tais componentes podem ser considerados aceitáveis tendo em vista serem as que mais contribuem para a distorção total.

5.2 PROPOSTA ALTERNATIVA

Ao longo da pesquisa bibliográfica, foram encontrados trabalhos relacionados à localização dos filtros para atenuação da distorção harmônica, com a aplicação de diferentes algoritmos que procurassem otimizar os possíveis pontos de instalação em um sistema de distribuição de energia de serviço público.

Neste trabalho, pelo fato de ser um sistema confinado a uma operadora de telefonia, e, portanto de pequenas dimensões e de baixa tensão, partiu-se do princípio de que os filtros devem ser instalados o mais próximo possível do quadro de distribuição das cargas essenciais, visto que as mesmas estão distribuídas pelos

diferentes andares do prédio da Central Telefônica.

Assim, esta proposta consiste em instalar um conjunto de filtros entre o GMG e o barramento do quadro de distribuição de corrente alternada do quadro de cargas essenciais. Utilizou-se um modelo do aplicativo *Simulink* com blocos mais representativos do sistema real, diferentemente do apresentado anteriormente com o circuito equivalente de Norton.

O estudo de viabilidade dos filtros baseou-se na variação da impedância Z_f em função da frequência, a partir do circuito equivalente mostrado na Figura 52 em seu diagrama unifilar (CHOU *et al.*, 2000). Na determinação das impedâncias equivalentes foi utilizado o operador $s = j\omega$. Os valores das indutâncias e das capacitâncias são os mesmos apresentados na Tabela 4. Na Figura 53 é mostrado o modelo com a inclusão dos filtros, todos trifásicos, destacando-se o retificador trifásico e o inversor estático controlado por PWM, com saída trifásica com conexão em estrela com neutro aterrado, uma vez que existem cargas essenciais monofásicas e trifásicas.

Figura 52 - Circuito equivalente dos filtros com impedância Z_f

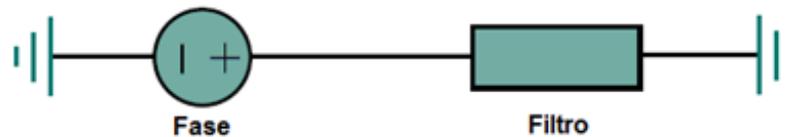
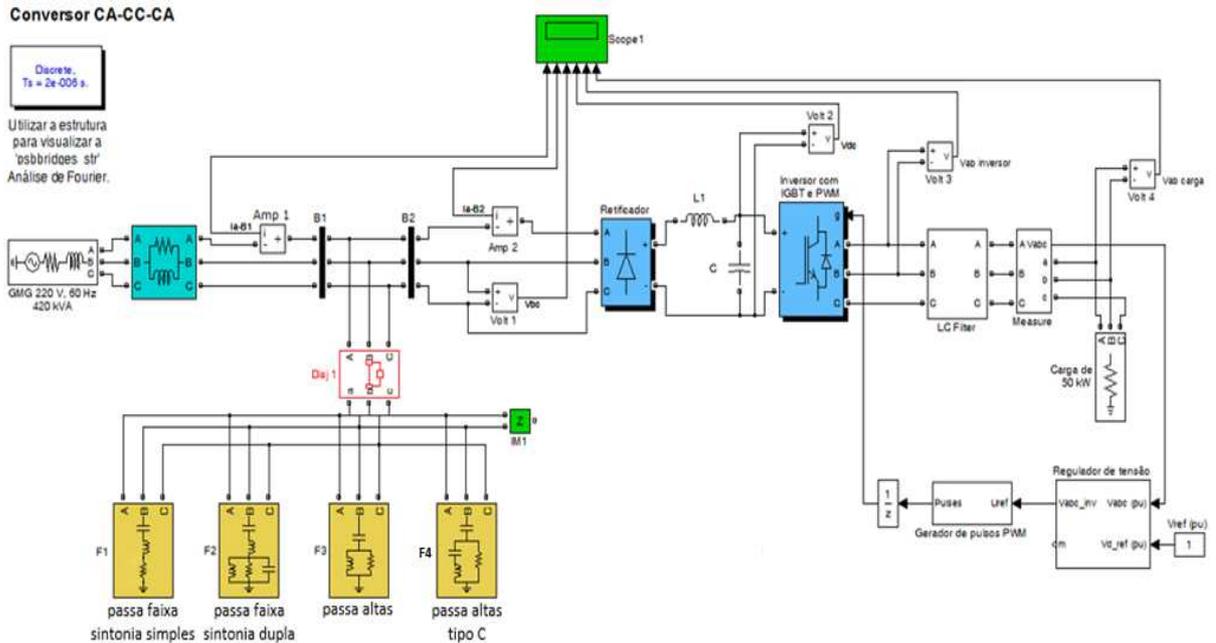


Figura 53 - Topologia do modelo alternativo em Simulink, com inclusão dos filtros

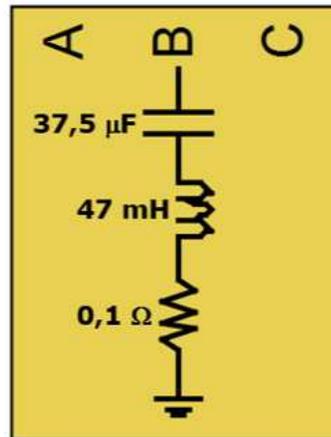


5.2.1 Filtro passa faixa com sintonia simples

Este primeiro filtro é do tipo passa faixa com sintonia simples, com frequência de ressonância em 20% acima de 120 Hz para redução da segunda harmônica e evitar a ressonância nessa frequência. Ele é formado por um circuito RLC em série (Figura 54) e sua impedância equivalente é (CHOU *et al.*, 2000):

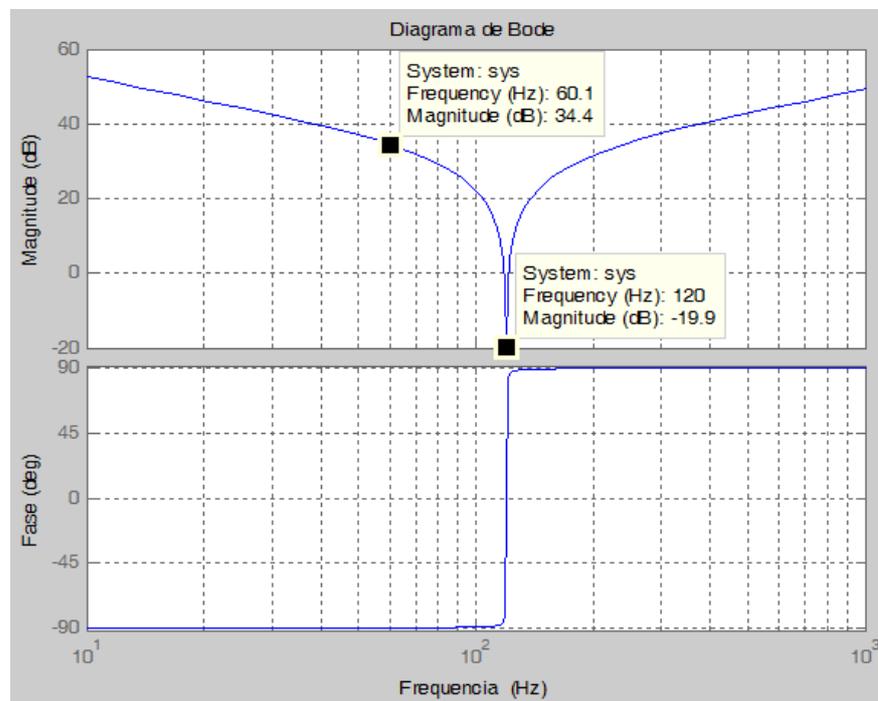
$$Z_f = \frac{LCs^2 + RCs + 1}{Cs} \quad (12)$$

Figura 54 - Topologia do filtro passa faixa com sintonia simples



Através do aplicativo MATLAB, obteve-se o diagrama de Bode, mostrado na Figura 55, para $R = 0,1 \Omega$, $L = 47 \text{ mH}$, $C = 37,5 \mu\text{F}$, no qual se observa uma atenuação da ordem de 54 dB em relação à frequência fundamental.

Figura 55 - Diagrama de Bode para o filtro passa faixa com sintonia simples



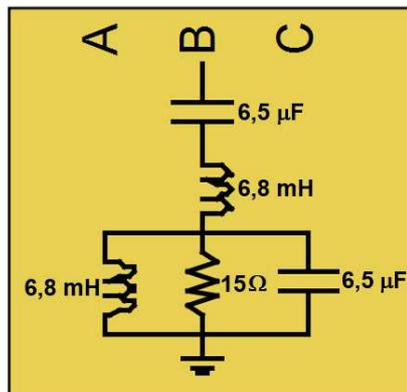
5.2.2 Filtro passa faixa com sintonia dupla

O segundo filtro é um passa faixa, desta vez com dupla sintonia. A frequência de corte inferior selecionada é adjacente à do filtro de sintonia simples, ou seja, 120 Hz, com o intuito de reforçar a atenuação da segunda harmônica. A de corte

superior corresponde à 23ª harmônica, em decorrência do fato de que os harmônicos de ordem mais elevada são aquelas que mais podem afetar um circuito telefônico, pois a faixa deste está entre 300 e 4000 Hz. A topologia deste filtro apresenta um circuito ressonante em série e outro em paralelo (Figura 56) e sua impedância equivalente é representada pela expressão (CHOU *et al.*, 2000):

$$Z_f = \frac{RL^2C^2s^4 + L^2Cs^3 + 3RLCs^2 + Ls + R}{RLC^2s^3 + LCs^2 + RCs} \quad (13)$$

Figura 56 - Topologia do filtro passa faixa com sintonia dupla



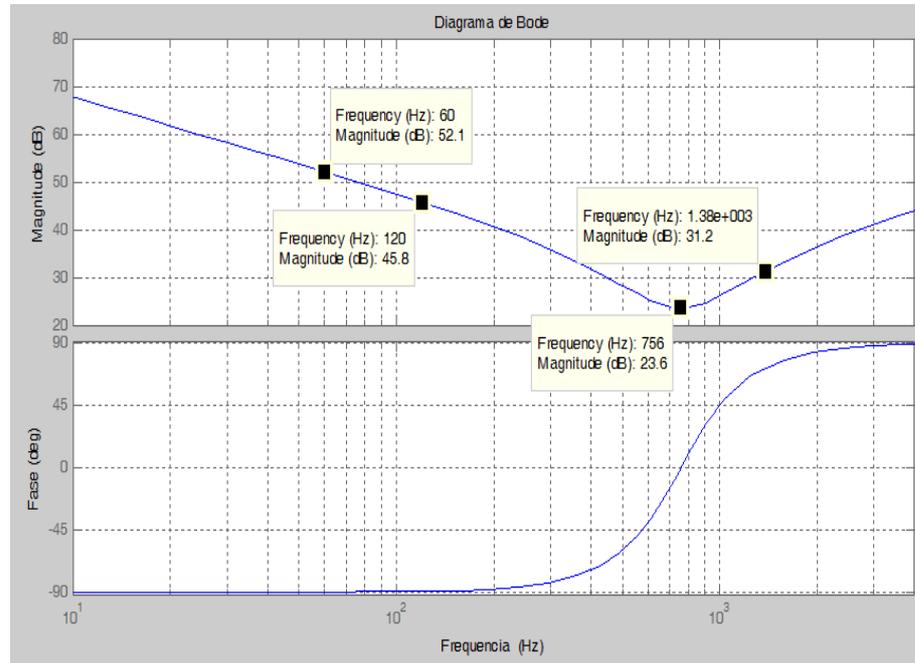
Por se tratar de um filtro passa faixa, a seletividade torna-se um aspecto mais crítico. Assim, optou-se por um valor mínimo de 20 para o fator Q, o que proporciona boa seletividade e implica em um valor de 15 ohms para o resistor.

Considera-se para este filtro a média geométrica dos harmônicos quinto e sétimo (THE MATHWORKS, 2011). Assim, tem-se:

$$f_{hm} = \sqrt{f_5 \cdot f_7} \cong 355 \text{ Hz} \quad (14)$$

O diagrama de Bode, mostrado na Figura 57, foi obtido com $R = 15 \Omega$, $L = 6,8 \text{ mH}$, $C = 6,5 \mu\text{F}$. Neste diagrama é mostrada a curva de variação da impedância em função da frequência, no qual se observa que a segunda harmônica está atenuada em cerca de 6 dB e a 23ª harmônica está atenuada em cerca de 21 dB, ambas em relação à frequência fundamental.

Figura 57 - Diagrama de Bode da resposta em frequência para o filtro passa faixa com sintonia dupla

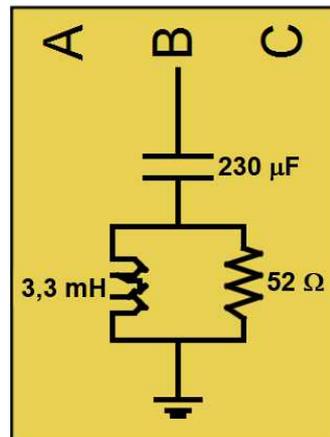


5.2.3 Filtro passa altas

Em seguida, vem um filtro passa altas sintonizado na terceira primeira harmônica (Figura 58), cuja impedância equivalente é (CHOU *et al.*, 2011):

$$Z_f = \frac{RLCs^2 + Ls + R}{LCs^2 + RCs} \quad (15)$$

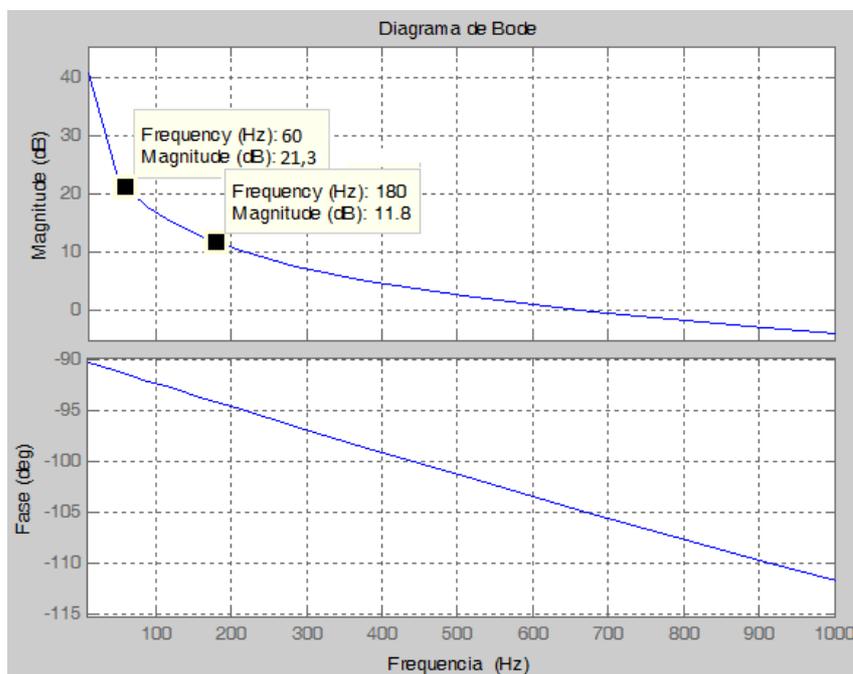
Figura 58 - Topologia do filtro passa altas



O fator de qualidade deste filtro está situado em um valor intermediário, isto é, igual a 7. Adotando-se os mesmos valores para L e C dos filtros anteriores, chega-se a 52 ohms para o valor do resistor.

Na Figura 59 é mostrado diagrama de Bode, obtido com $R = 52 \Omega$, $L = 3,3$ mH, $C = 230 \mu\text{F}$. Neste diagrama observa-se uma atenuação de cerca de 9,5 dB entre a frequência fundamental e a terceira harmônica, com queda em torno de 5 dB por oitava, a partir de 180 Hz.

Figura 59 - Diagrama de Bode para o filtro passa altas

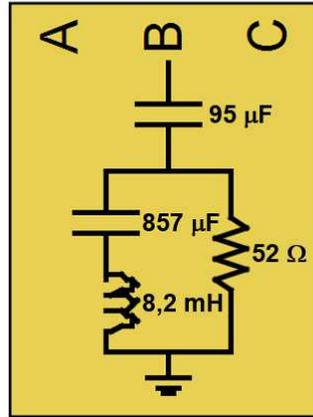


5.2.4 Filtro passa altas tipo C

Finalmente, tem-se o filtro passa altas tipo C, sintonizado em 300 Hz, pois esta componente é bastante elevada no tipo de carga não linear analisada. Optou-se por um fator de qualidade de 2. Um valor mais elevado apresentaria a vantagem de ser mais seletivo, porém com a desvantagem da maior complexidade, principalmente em se tratando de frequências baixas. A função do resistor é limitar a impedância do filtro nas frequências altas, enquanto que o segundo capacitor (C') tem a função de sintonizar o filtro na frequência fundamental, evitando as perdas em 60 Hz (Figura 60). A impedância equivalente deste filtro é fornecida por (CHOU *et al.*, 2011):

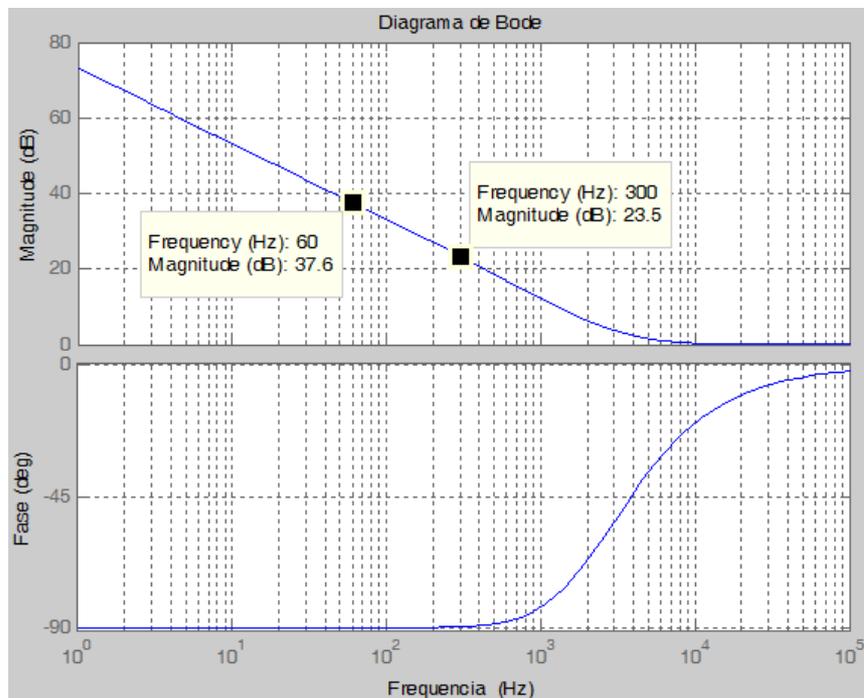
$$Z_f = \frac{LCC's^3 + LC's^2 + (C + RC)s + 1}{LCC's^3 + RCC's^2 + Cs} \quad (16)$$

Figura 60 - Topologia do filtro passa altas tipo C



Na Figura 61 é mostrado diagrama de Bode, obtido com $R = 52 \Omega$, $L = 8,2 \text{ mH}$, $C = 95 \mu\text{F}$ e $C' = 857 \mu\text{F}$. A impedância na quinta harmônica está atenuada em cerca de 14 dB, com amortecimento da ordem de 8 dB por oitava.

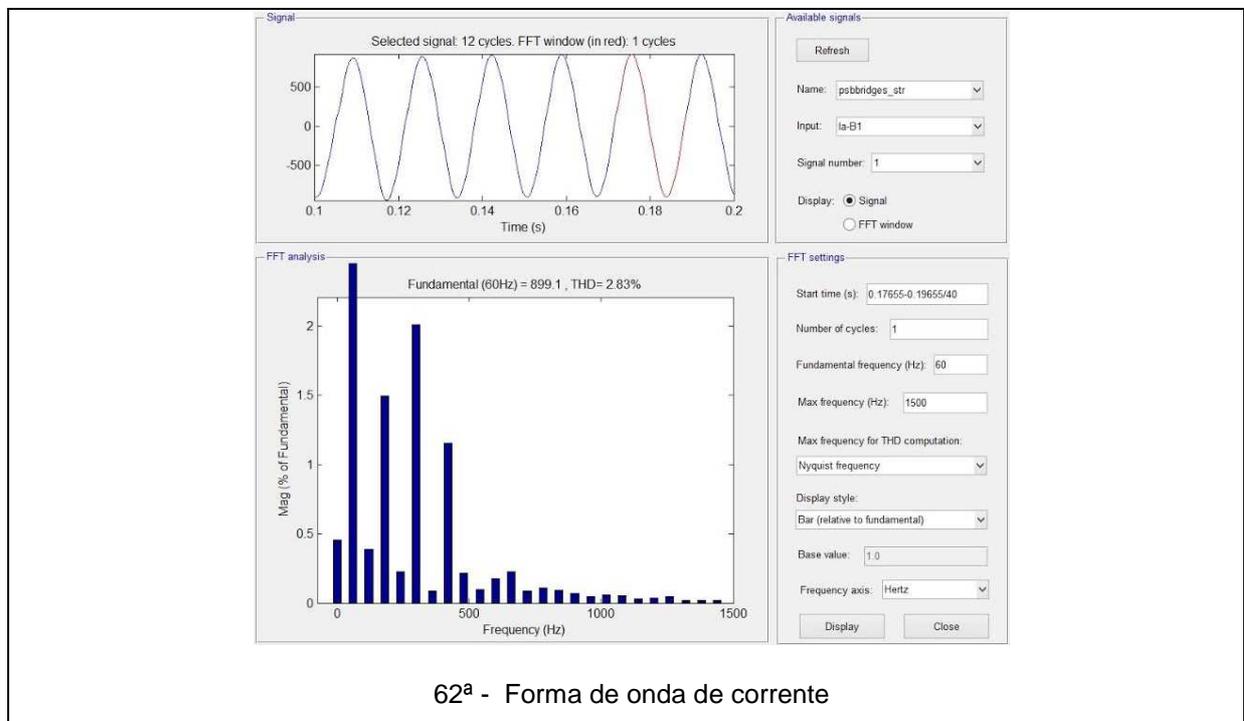
Figura 61 - Diagrama de Bode para o filtro passa altas tipo C



É importante que haja redução considerável nas componentes de alta frequência das correntes por serem elas que geram os campos magnéticos mais severos do ponto de vista de interferência nos circuitos telefônicos. Em nível analógico, a faixa dos circuitos situa-se entre 300 e 4000 Hz. Em nível digital, a amostragem do sinal de voz é feita a partir de uma portadora pulsada com frequência de 8000 Hz. Estas características deixam o sistema telefônico bastante vulnerável aos componentes harmônicos, as de valores mais elevados.

Na Figura 62, são mostrados os diagramas com as distorções reduzidas de forma acentuada após a inserção dos filtros, comparativamente aos diagramas da Figura 49. A distorção da corrente foi reduzida para 2,83% e a da tensão para 2,97%. O valor da distorção de tensão obtida está abaixo do limite estabelecido pela ABNT (NBR 14664, 2001). Na Figura 63 é mostrada a curva de variação da impedância em função da frequência, na qual pode-se observar as atenuações correspondentes a cada um dos harmônicos considerados no dimensionamento dos filtros.

Figura 62 - Formas de ondas de corrente e de tensão obtidas com a simulação alternativa em Simulink, após a inserção dos filtros



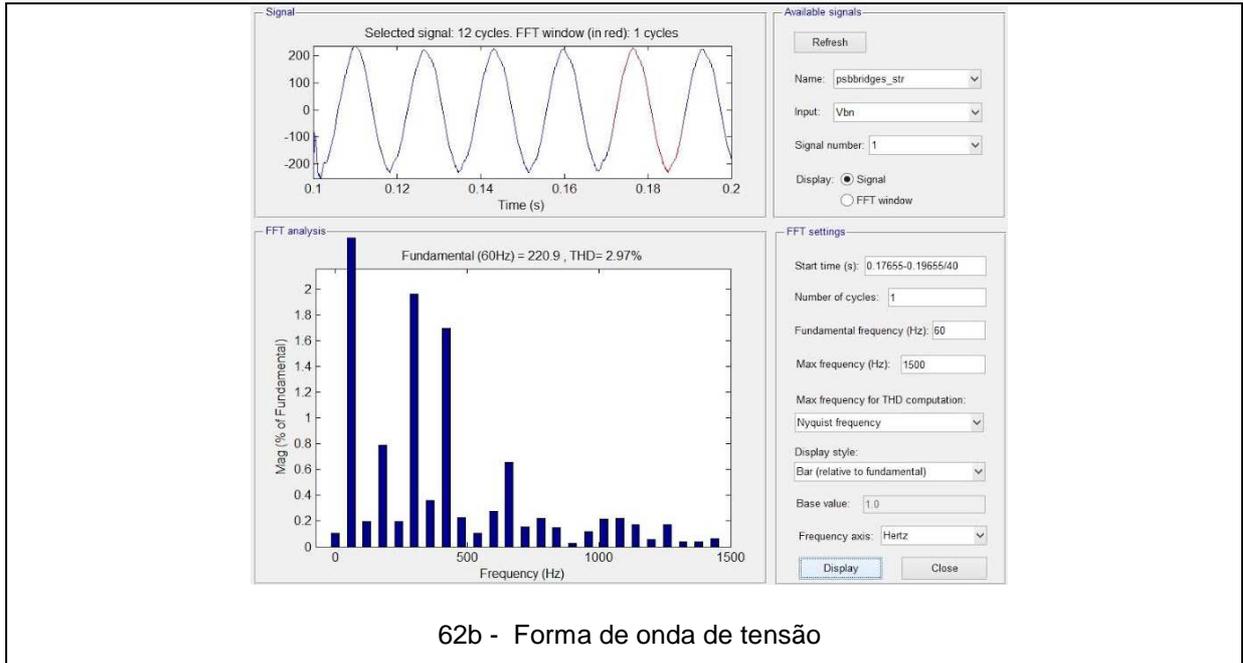
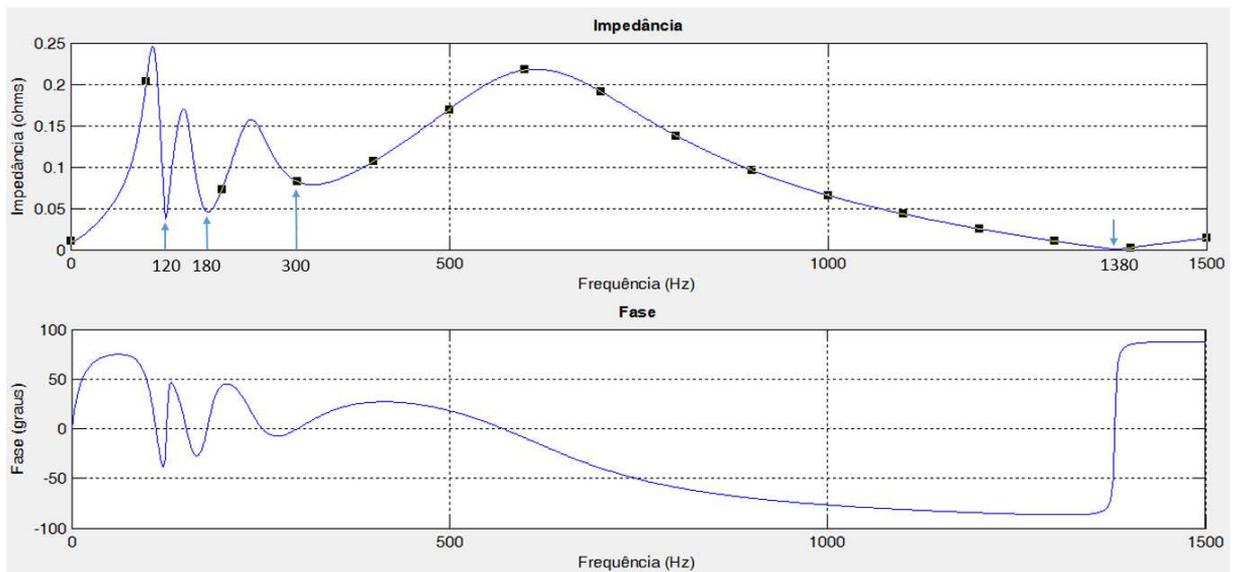


Figura 63 - Curva da impedância resultante com o conjunto dos filtros inseridos



Este capítulo procurou mostrar a viabilidade da redução da distorção com filtros passivos instalados no barramento do quadro de distribuição do barramento essencial do GMG. Os filtros passivos apresentam a vantagem de não utilizar componentes a semicondutores e, por isso, com menor incidência de defeitos, com redução do custo de manutenção.

6 CONCLUSÃO

A contribuição deste trabalho reside no fato de que, durante a pesquisa bibliográfica, não foram encontradas publicações que abordassem especificamente a distorção harmônica no sistema de geração própria de uma Central Telefônica. Embora existam alguns trabalhos relativos aos sistemas telefônicos em conjunto com qualidade da energia elétrica, estes analisam as interrupções e, eventualmente, ruídos periódicos e aleatórios.

As medições realizadas em campo permitiram confirmar que o barramento do quadro de distribuição de corrente alternada alimentado pelo GMG apresenta maior distorção do que quando é alimentado pela rede da concessionária.

A análise qualitativa, realizada com osciloscópio, confirmou a presença da distorção harmônica, tanto com a carga alimentada pela concessionária como pelo GMG. Quanto à análise quantitativa, não houve alterações substanciais nas distorções das correntes quando se compara a alimentação pela rede com a alimentação pelo GMG, resultado previsível, uma vez que a distorção é causada pela carga não linear da própria central. No que tange às distorções de tensão da rede, houve conformidade em relação à recomendação da ANEEL. Porém, quando se tratou do GMG, tanto os valores de tensão quanto os de corrente ultrapassaram os limites recomendados pela NBR 14664 da ABNT.

Apesar das distorções existentes, não foram detectadas alterações dos indicadores operacionais, conforme análise do banco de dados pelo corpo técnico da concessionária estudada. Entretanto, há fortes indícios de impacto sobre os indicadores, mas que não são revelados por se tratarem de informações sensíveis.

Foram feitas simulações computacionais com o aplicativo MATLAB, inicialmente com o circuito equivalente baseado no Teorema de Norton e, em seguida, com diagrama de blocos representativos dos diversos subsistemas. Tais modelagens possibilitaram a apresentação de propostas mitigadoras adicionais na solução do problema. Tais simulações utilizaram grandezas com valores que permitissem a maior semelhança possível com as formas de onda obtidas nas medições em campo. Assim, as resistências, indutâncias e capacitâncias tiveram seus valores reajustados de forma que foram obtidas aproximações com erro de

1,7% para a tensão e de 2,2% para a corrente. Neste caso, o menor erro para a corrente foi de grande importância porquanto as distorções das correntes são mais danosas na produção de interferência eletromagnética em uma central telefônica. Em razão disto, o foco deste trabalho são as correntes.

Após as simulações para compatibilizar o modelo adotado, foram apresentadas propostas com filtros passivos. Inicialmente, foram propostos filtros sintonizados e não sintonizados a serem instalados próximos à FIE, com base no modelo aplicando o Teorema de Norton. Em seguida, foi apresentado um modelo com a instalação de quatro conjuntos de filtros trifásicos sintonizados nos harmônicos de ordens terceira, quinta, sétima e décima primeira, por serem as que mais contribuíram para as distorções. O local de instalação proposto foi no próprio barramento do QDCA das cargas essenciais, com base em que as cargas não lineares estão distribuídas por diferentes andares do prédio.

As simulações com os filtros feitas com o MATLAB produziram uma curva de impedância versus frequência com baixos valores nos componentes para as quais os filtros foram sintonizados, respectivamente. As baixas impedâncias permitiram que as distorções de tensão baixassem de 8,23% para 1,7% e as de corrente de 55,47% para 2,2%, em números aproximados. Estes valores tomaram como referência as grandezas da fase B, por ter sido a que mais apresentou distorções. Vale ressaltar que, apesar de um sistema de pequeno porte em relação ao de uma concessionária, não se trata de um sistema equilibrado.

Não obstante os filtros terem se mostrado viáveis em termos de simulação computacional, é necessária uma avaliação técnico-econômica que abranja a inclusão de filtro ativo e inversor multiníveis na análise, juntamente à implementação de pesquisas aprofundadas, já que as distorções aumentarão com o inevitável crescimento das cargas não lineares.

Recomendam-se, com o objetivo de aprofundamento dos estudos, as pesquisas:

- a. Perdas financeiras devidas à distorção harmônica em uma Central Telefônica;
- b. Redimensionamento econômico dos condutores utilizados no sistema de energia de uma Central Telefônica.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. P. G.; JUNIOR, N. O.; PEREIRA, A. C. C. Influência dos Inversores PWM na Qualidade de Energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 2., 1997, São Lourenço. **Anais...** Itajubá: SBQEE, 1997. p. 1-6.
- ADDOWEESH, K. E.; KHAN, Y; SHER, H. A. Harmonic Generation, Propagation and Purging Techniques in Non-Linear Loads. In: AN UPDATE on Power Quality. Riyadh, Saudi Arabia: INTECH, 2003. Cap. 1, 3-20.
- AHMED, A. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Pearson, 2009.
- ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Plano Geral de Metas de Qualidade – PGMQ**. Brasília, de 19 de junho de 2002.
- ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Regulamento de gestão da qualidade da prestação do serviço telefônico fixo comutado (RGQ-STFC), conforme Resolução 605/2012**. Brasília, 2012.
- ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8, Revisão 1**. Brasília, 2011.
- ARIOLI, V, T. et al. Avaliação do uso de baterias de íon de lítio em aplicação estacionária em Telecomunicações. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE), 21., 2012. **Anais...** 2012.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14664. **Grupos geradores – requisitos gerais para telecomunicações**. Rio de Janeiro, 2001.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10151. **Avaliação do ruído em áreas habitadas**. Rio de Janeiro, 2000.
- BARRADAS, O.; SILVA, A. **Telecomunicações: sistemas de energia**. Rio de Janeiro: EDITELE, 1980.
- BARRADAS, O.; SILVA, A. **Você e as telecomunicações**. Rio de Janeiro: Interciências, 1995.
- BEATY, H. **Electric power systems quality**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw Hill, 2012.
- BHUVANESWARI, G.; SINGH, B.; SINGH, S. Power quality improvement in telecommunication power supply system using buck rectifier. In: IEEE ANNUAL INDIA CONFERENCE, 2011, Hyderabad, India. **Anais...** Danvers, EUA: IEEE Conference Publications, 2011. p. 1-4.
- BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. Signal processing of power quality disturbances. IEEE press series on Power Engineering Society, Mohamed E. El-Hawary. [S.l.]:

IEEE Press, 2006. (Series editor).

BROSHI, A. Monitoring power quality beyond EN 50160 and IEC 61000-4-30. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2008, Chicago. **Anais...** Danvers, EUA: IEEE Power Engineering Society Conference Publications, 2008. p. 1-6.

CACIOTTA, M.; GROSSONI, M.; LECCESE, F. Power quality measurements in telecommunication exchanges delivery points. In: IEEE INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS ENERGY CONFERENCE, 30., 2008, San Diego, EUA. **Anais ...** Danvers, EUA: IEEE Conference Publications, 2008. p. 1-5.

CHOU, C. J. et al. Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high Voltage Levels. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.15, n.1, p.433-441, fev. 2000.

COLNAGO, G. P. et al. A nova norma de qualidade de energia elétrica brasileira e um medidor de baixo custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 11., 2011, Cuiabá. **Anais ...** Itajubá: SBQEE, 2011. p. 617-622.

CHUNG, I. et al. Development of Power Quality Diagnosis System for Power Quality Improvement. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2003, Toronto, Canadá. **Proceedings...** Toronto: IEEE, 2003. p. 1256-1261.

CRUZ, H. C.; PESSANHA, J. E. O. Investigação da Qualidade de Energia em um Centro de Lançamento de Foguetes. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (CBQEE), 10., Lindóia, 2013. **Anais...** 2013.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Condicionamento de energia e dispositivos FACTS.** Campinas, SP: DSCE FEE Unicamp, 2005. 27 f. Apostila.

DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade de energia elétrica.** Campinas, SP: DSCE FEE UNICAMP, 2010. 11 f. Apostila.

DITTMANN, F. The development of power electronics in Europe. In: HEINZ NIXDORF MUSEUM FORUM. 1993?. Paderborn, Alemanha. 1993?. p. 1-12.

FERREIRA T. V. et al. **Lâmpadas fluorescentes e distorções harmônicas:** eficiência energética e qualidade de energia. O setor elétrico. 49. ed. São Paulo: Atitude Editorial, 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGLEY JR., C.; UMAS, S. D. **Máquinas elétricas:** com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. São Paulo: Artmed, 2006.

FUCHS, E.; MASOUM, M. **Power quality in power systems and electrical machines.** San Diego, EUA: Elsevier, 2008.

GALHARDO, M.; PINHO, J. Influência da forma de onda de alimentação sobre cargas não lineares em sistemas de geração de pequeno porte. In: CONGRESSO

BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 6., 2005, Belém. **Anais ...** Itajubá: SBQEE, 2005. p. 815-821.

GOLKAR, M. Electric Power Quality: Types and Measurements. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION, RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2004, Hong Kong. **Proceedings...** Danvers, EUA: IEEE, 2004. p. 317-321.

GOMES, A. T. **Telecomunicações – Transmissão e Recepção AM/FM – Sistemas Pulsados**. São Paulo. Érica, 2002.

HARRISON, J. Designing a power quality strategy for telecommunication systems protects your investments. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION ENERGY CONFERENCE, 21., 1999, Copenhaguem, Dinamarca. **Proceedings...** Danvers, EUA, 1999. p. 1-3.

HAYKIN, S.; VEEN, B. **Sinais e sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 1999.

HAYKIN, S. **Sistemas de comunicação: analógicas e digitais**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROMECHANICAL COMMISSION. **Electromagnetic compatibility – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods - IEC 61000-4-30**. 2008.

IRWIN, J. D.; WILAMOWSKI, J. D. **Industrial electronics handbook**. Cleveland, EUA: CRC Press, 1997.

JESUS, N. C. et al. Análise da influência de cargas não lineares: Avaliação dos efeitos e limites de cortes de tensão (*voltage notching*). In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, Aracaju. **Anais ...** Itajubá: SBQEE, 2003. p. 13-18.

JESZENSKY, P. **Sistemas telefônicos**. Barueri, SP. Manole, 2004.

KUSKO, A.; THOMPSON, M. T. **Power quality in electrical systems**. Nova Iorque: McGraw Hill, 2007.

LECCESE, F. Rome, a First Example of Perceived Power Quality of Electrical Energy: the Telecommunication Point of View. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS ENERGY CONFERENCE, 29., 2007, Roma. **Anais ...** Danvers, EUA: IEEE Conference Publications, 2007. p. 369-372.

MARCHESAN, G. A influência de ruídos e distorções harmônicas sobre os rastreadores de frequência. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (CBQEE). Cuiabá, 2011. **Anais ...** Itajubá: SBQEE, 2011.

NOUROLLAH, S.; MOALLEM, M. A data mining method for obtaining global power quality index. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC POWER AND ENERGY CONVERSION SYSTEMS, 2., 2011, Sharjah, Irã. **Anais ...** Danvers, EUA:

IEEE Conference Publications, 2011. p. 1-7.

PARENTONI, M. F. C. A Proposition for Transformers Design Submitted to Nonlinear Loads Conditions. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (CBQEE), 9., Cuiabá, 2011. **Anais...** Itajubá: SBQEE, 2011.

PEDRAZA A.; PINZÓN J.; SANTAMARÍA F. Harmonic Impact of Non-Linear Loads in a Power Distribution System. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 10., 2013, Lindóia. **Anais...** Itajubá: SBQEE, 2013. p. 1-5.

PENGHUI, Li *et al.* Power Quality Monitoring of Power System Based on Spectrum Analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-PRODUCT E-SERVICE AND E-ENTERTAINMENT, 2010, Henan, China. **Anais...** Danvers, EUA: IEEE Conference Publications, 2010. p. 1-4.

PROCOBRE – INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas instalações elétricas:** causas, efeitos e soluções. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre, nov. 2001. p.3-66,

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência:** circuitos, dispositivos e aplicações. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1999.

RMS INDÚSTRIA ELETRÔNICA. **ANAWIN versão 3.16.** [S.l.]: [s.n.], 2001.

SCHNEIDER ELECTRIC. Qualidade de energia: harmônicas. **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**, São Paulo, p.4-19, mar. 2003.

SHAFFER, R. **Fundamentals of power electronics with MATLAB.** Boston, EUA: Charles River Media, 2007.

SOARES, A. P. et al. Avaliação do uso de baterias de íon de lítio em aplicação estacionária em Telecomunicações. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE), 21., 2012. **Anais...** 2012.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** New Jersey: IEEE Std 1159. 1995.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **Recommended Practice for Power Distribution in Industrial Plants.** New York: IEEE Std 141-1993.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** IEEE Std 519. New York, 1992.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **Sine-wave Distortions in Power Systems and the Impact on Protective Relaying.** Relatório preparado Comitê de Relés de Sistemas de Potência da Sociedade de Engenharia de Potência. New Jersey, nov. 992.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **Protective relaying and power quality** – IEEE PSRC Working Group Report. New York, 2000.

THE MATHWORKS, INC. MATLAB for Windows versão 7.12.0.635. 2011. 1 DVD-ROM.

TUDE, E. **Qualidade da Telefonia Fixa**. 2004. 4 f. Tutorial. São José dos Campos. Teleco.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – UIT. **O.41**: Psophometer use on telephone-types circuits. Genebra, Suíça, 1988. 53.p.

WILSON, T. The evolution of power electronics. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 1992, Xian, China. **Anais...** Nova Iorque: Proceedings of the IEEE, 1992. p.1-9.