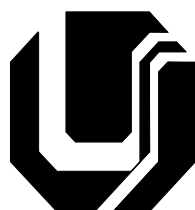


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE
EQUIPAMENTOS MITIGADORES DE
HARMÔNICOS E COMPENSADORES DE
ENERGIA REATIVA

Marcelo Inácio Lemes

Uberlândia, Dezembro de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**COMPARAÇÃO TÉCNICA-ECONÔMICA ENTRE
EQUIPAMENTOS MITIGADORES DE HARMÔNICOS
E COMPENSADORES DE ENERGIA REATIVA**

Marcelo Inácio Lemes

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a Banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários á obtenção do título de Mestre em Ciências.

Antônio Carlos Delaiba, Dr. (Orientador) – UFU
Milton Itsuo Samesima, Dr. – UFU
Luiz Fernando Bovolato, Dr. – UNESP

Uberlândia, Dezembro de 2010.

COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE EQUIPAMENTOS MITIGADORES DE HARMÔNICOS E COMPENSADORES DE ENERGIA REATIVA

MARCELO INÁCIO LEMES

Dissertação apresentada por Marcelo Inácio Lemes à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Antônio Carlos Delaiba, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais,
Almir e Elizabeth, ao meu irmão Cristiano, ao
meu amor Daniela e a todos meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pela minha vida, pelos meus pais, amigos e por todas as bênçãos que Ele tem derramado sobre mim durante todos os momentos de minha vida.

Ao professor **Milton Itsuo Samesima** por todo auxílio neste trabalho, pela sincera amizade, paciência, presteza e principalmente pela confiança na minha capacidade de realização deste trabalho.

Ao amigo **Flávio Resende Garcia** pela orientação, pelos ensinamentos, pelo incentivo, pela presteza e por toda a ajuda e apoio ao longo deste trabalho sem receber nada em troca senão minha eterna gratidão.

Ao amigo **Fernando Eduardo Leal Linhares** pelo apoio, incentivo e que auxiliou de forma imprescindível para o término deste trabalho.

A todos os **professores e funcionários dessa instituição**, que sempre me receberam de forma bastante atenciosa e educada, e que durante todos os momentos, deram total apoio para a realização deste.

A toda **minha família**, na pessoa de meus pais, **Almir e Elizabeth**, irmão, **Cristiano**, e **demaís familiares** por sempre terem me incentivado em todos os momentos de minha vida, desde a infância até os dias de hoje, pelo apoio durante a realização desta pós-graduação e pela compreensão às várias ausências do seu convívio.

À **Daniela Chaves Lusne** pelo apoio, incentivo, carinho e pela compreensão às várias ausências do seu convívio.

Aos queridos amigos (as) **Angélica, Arthur, Arnaldo, Carlos Eduardo “Cadu”, Daniel, Elias, Elise, Fabrício, Fernanda, Guilherme, Isaque, Ivan, João, Loana, Marcus Vinícius, Orlando**, que fizeram parte de meu convívio durante esses anos de mestrado, e que tiveram papel imprescindível para a realização dessa obra.

Aos demais amigos, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nos agradecimentos que faço em meu coração, por todo carinho e apoio, ao longo de minha vida e para realização desse trabalho.

À **CAPES** pelo apoio financeiro, enquanto necessário.

RESUMO

Equipamentos mitigadores de harmônicos e compensadores de energia reativa têm sido bastante discutidos e aplicados nos últimos anos com sucesso nas mais variadas instalações comerciais e industriais, fomentados pela eliminação da tarifação por baixo fator de potência e por problemas advindos do aumento significativo de cargas não lineares conectadas a estes sistemas elétricos. Atualmente, diversos tipos de equipamentos que fazem à dupla função de redução do conteúdo harmônico e correção do fator de potência são aplicados, utilizando técnicas de simulação e estudos bem conhecidos (através de programas computacionais de fluxo de carga e fluxo harmônicos) visando garantir a resposta em campo mais adequada. Neste sentido, o trabalho proposto tem por objetivo mostrar uma comparação técnico-econômica entre os equipamentos mais utilizados como solução do fator de potência e de problemas com harmônicos, sendo eles: banco de capacitores, filtro harmônico passivo dessintonizado, filtro harmônico passivo sintonizado, filtro harmônico ativo e filtro harmônico híbrido. Será avaliado o desempenho destes equipamentos através dos seguintes aspectos técnicos: tensão eficaz, corrente eficaz, distorção harmônica total de tensão (DTT), distorção harmônica total de corrente (DTI), potência ativa, reativa, aparente, distorção harmônica e fator de potência. As simulações com a aplicação de todos os tipos de equipamentos citados, de correção do fator de potência e filtragem de harmônicos, proporcionarão resultados com seus respectivos custos de aplicação. Finalmente, serão apresentados os resultados obtidos através do monitoramento em campo das principais grandezas elétricas em análise, da solução adotada em função de uma melhor relação custo x benefício, bem como do desempenho dos equipamentos instalados, para os objetivos desejados pela empresa consumidora.

Palavras-Chave: Capacitores, distorção harmônica, fator de potência, filtros harmônicos, qualidade da energia.

ABSTRACT

Soothing Equipment of harmonics and compensating reactive power have been widely discussed and applied successfully in recent years in the most varied industrial and commercial installations, encouraged by eliminating the fine for low power factor and by problems arising out of the significant increase in non-linear loads connected to these electrical systems. Currently, various types of equipment that do the dual function of reducing harmonic content and power factor correction are applied using simulation techniques and well-known studies (through programmes computational load flow and flow harmonics) to ensure the most appropriate field response. In this sense, the proposed work is to show a technical-economical comparison between the equipment most frequently used as a solution of power factor and problems with harmonics, being them: Bank capacitors, passive harmonic filter detuned, passive harmonic filter tuned active harmonic filter, and harmonic hybrid filter. Evaluates the performance of each of these equipment mentioned above, where the following technical aspects will be assessed: voltage, current effective, total harmonic distortion of voltage (DVT), total harmonic distortion of current (DTC), active power, reactive, apparent, harmonic distortion and power factor. Simulations with the application of all types of equipment cited, power factor correction and filtering of harmonics, provide results with their respective implementation costs. Finally, the results obtained will be presented by monitoring in the field of the main electrical magnitudes in analysis, the solution adopted in the light of better cost x benefit and the performance of equipment installed for the desired by the company consumer goals.

Keywords: Capacitors, harmonic distortion, power factor, harmonics filters, quality of energy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	19
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.2 ESTADO DA ARTE	21
1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO	24
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
CAPÍTULO II.....	29
2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	29
2.1 INTRODUÇÃO	29
2.2 CONCEITUAÇÃO DE HARMÔNICAS	29
2.3 QUANTIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS	31
2.4 HARMÔNICOS EM TERMOS DE COMPONENTES SIMÉTRICOS	32
2.5 FONTES HARMÔNICAS	34
2.6 EFEITOS IMPORTANTES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS	38
2.7 FATOR DE POTÊNCIA	48
2.8 LEGISLAÇÃO	53
2.9 SOLUÇÕES PARA A MITIGAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS	60
2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
CAPÍTULO III	63
3 FILTROS HARMÔNICOS	63
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
3.2 CAPACITORES DE POTÊNCIA	64
3.3 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS	72
3.4 FILTROS PASSIVOS DESSINTONIZADOS.....	85
3.5 FILTROS ATIVOS	86
3.6 FILTROS HÍBRIDOS.....	105
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	111

CAPÍTULO IV.....	114
4 SIMULAÇÃO DIGITAL E COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE FILTROS.....	114
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	114
4.2 ESTUDO DE CASO REAL	115
4.3 SIMULAÇÕES DO CASO BASE.....	126
4.4 CASO 1 - BANCO DE CAPACITOR PURO.....	132
4.5 CASO 2 - FILTRO DESSINTONIZADO	137
4.6 CASO 3 - FILTRO HARMÔNICO PASSIVO SINTONIZADO.....	143
4.7 CASO 4 - FILTRO ATIVO.....	156
4.8 CASO 5 - FILTRO ATIVO E FILTRO DESSINTONIZADO (FILTRO HÍBRIDO)	162
4.9 CUSTOS DOS BANCOS DE CAPACITORES E FILTROS HARMÔNICOS	167
4.10 COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DOS CASOS SIMULADOS	169
4.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS	172
CAPÍTULO V	174
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHOS DOS FILTROS PASSIVOS	174
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	174
5.2 RESULTADOS.....	174
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	187
CAPÍTULO VI.....	188
6 CONCLUSÕES GERAIS	188
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	195

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Decomposição em componentes simétricas.....	33
Figura 2.2- Acréscimo nas perdas elétricas do motor de indução em função da distorção harmônica total de tensão de alimentação.	40
Figura 2.3- Redução da vida útil do transformador em função da distorção harmônica a que é submetido.....	42
Figura 2.4- Circuito série.	44
Figura 2.5 – Circuito paralelo:	46
Figura 2.6- Diagrama de potências segundo modelo de Budeanu.....	49
Figura 3.1- Representação do capacitor plano.....	66
Figura 3.2- Capacitor com tecnologia PPM.....	68
Figura 3.3- Capacitor com tecnologia não PPM.	70
Figura 3.4- Diagrama de um circuito RLC série.	73
Figura 3.5 – Impedância de um circuito RLC série versus frequência.	77
Figura 3.6- Impedância versus frequência, para diversos valores do fator Q.	80
Figura 3.7- Filtro ativo de potência com estrutura CSI.	89
Figura 3.8- Filtro ativo de potência com estrutura VSI.	90
Figura 3.9- Filtro ativo paralelo, com estrutura VSI, conectado ao sistema elétrico. .	91
Figura 3.10- Filtro ativo paralelo atuando como fonte de corrente CA controlada.....	92
Figura 3.11- Filtro ativo série, com estrutura VSI, conectado ao sistema elétrico.....	93
Figura 3.12- Filtro ativo série atuando como fonte de tensão CA controlada.....	93
Figura 3.13- Associação de filtro ativo série e ativo paralelo.	94
Figura 3.14- Filtro ativo série a dois fios: a) com estrutura CSI, b) com estrutura VSI.	96
Figura 3.15- Filtro ativo paralelo a dois fios: a) com estrutura CSI, b) com estrutura VSI.	96
Figura 3.16- Filtro ativo série trifásico a três fios.	98
Figura 3.17- Filtro ativo paralelo trifásico a três fios.	98
Figura 3.18- Filtro ativo paralelo a quatro fios com derivação capacitiva no barramento CC.....	100
Figura 3.19- Filtro ativo paralelo a quatro fios com inversor com quatro braços.	100
Figura 3.20- Filtro ativo paralelo a quatro fios com três pontes monofásicas.....	101

Figura 3.21- Filtro ativo paralelo com conversor três níveis.	102
Figura 3.22- Topologia de um filtro híbrido série.	107
Figura 3.23- Filtro híbrido paralelo.	109
Figura 3.24- Filtro híbrido série-paralelo.	110
Figura 4.1- Diagrama unifilar da empresa.	117
Figura 4.2- Comportamento da potência aparente total.	119
Figura 4.3- Comportamento do fator de potência total.	120
Figura 4.4- Comportamento do fator de deslocamento.	121
Figura 4.5- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.	122
Figura 4.6- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade P95 percentuais.	123
Figura 4.7- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.....	123
Figura 4.8- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.	124
Figura 4.9- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade p95 percentuais.....	124
Figura 4.10- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.....	125
Figura 4.11- Forma de onda da tensão no instante de maior distorção harmônica ao longo da medição.	126
Figura 4.12- Forma de onda da corrente no instante de maior distorção harmônica ao longo da medição.	126
Figura 4.13- Diagrama unifilar do caso simulado.	127
Figura 4.14- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado.....	129
Figura 4.15- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado.....	130
Figura 4.16- Impedância vista da barra no secundário do transformador.	131
Figura 4.17- Diagrama unifilar com banco de capacitor puro.....	132
Figura 4.18- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com banco de capacitor puro.....	134

Figura 4.19- Impedância da barra no secundário do transformador simulado com banco de capacitor puro.....	135
Figura 4.20- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com banco de capacitor puro.....	135
Figura 4.21- Diagrama unifilar com filtro dessintonizado instalado.	138
Figura 4.22- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtro dessintonizado.....	139
Figura 4.23- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtro dessintonizado.....	140
Figura 4.24- Impedância da barra no secundário do transformador simulado com filtro dessintonizado.....	141
Figura 4.25- Diagrama unifilar com filtros de 5 ^a , 7 ^a e 11 ^a ordens.....	151
Figura 4.26- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtros de 5 ^o , 7 ^o e 11 ^o ordens.....	152
Figura 4.27- Impedância da barra no secundário do transformador simulado com filtros de 5 ^a , 7 ^a e 11 ^a ordens.....	153
Figura 4.28- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtros de 5 ^a , 7 ^a e 11 ^a ordens.....	154
Figura 4.29- Diagrama unifilar com filtro ativo de 200A.....	159
Figura 4.30- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtro ativo de 200A.....	160
Figura 4.31- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtro ativo de 200A.....	161
Figura 4.32- Diagrama unifilar com filtro híbrido.....	164
Figura 4.33- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtro híbrido.....	165
Figura 4.34- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtro híbrido.....	165
Figura 5.1- Comportamento da tensão fase-fase eficaz.....	175
Figura 5.2- Comportamento da corrente total eficaz.	176
Figura 5.3- Comportamento da potência ativa total.....	177
Figura 5.4- Comportamento da potência reativa total.	178
Figura 5.5- Comportamento da potência de distorção total.....	178
Figura 5.6- Comportamento da potência aparente total.....	179

Figura 5.7- Comportamento do fator de potência total.	180
Figura 5.8- Comportamento do fator de potência para fundamental.	181
Figura 5.9- Comportamento da distorção harmônica total de tensão fase-fase.	182
Figura 5.10- Comportamento da distorção harmônica total de corrente.	183
Figura 5.11- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.	184
Figura 5.12- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade P95 percentuais.	184
Figura 5.13- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.....	185
Figura 5.14- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.	185
Figura 5.15- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade P95 percentuais.	186
Figura 5.16- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.....	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	54
Tabela 2-2: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).....	54
Tabela 2-3: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão	55
Tabela 2-4: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).....	55
Tabela 2-5: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	56
Tabela 2-6: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).....	56
Tabela 2-7: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).....	57
Tabela 2-8: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).....	57
Tabela 2-9: Limites de tensão harmônica	58
Tabela 2-10: Bases para o limite de corrente harmônicas	58
Tabela 2-11: Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição geral ..	59
Tabela 2-12: Limites de distorção de corrente para sistemas de sub-transmissão geral (entre 69kV e 161kV)	59
Tabela 2-13: Limites de distorção de corrente para sistemas de transmissão geral (maior que 161kV), geração distribuída e co-geração.....	59
Tabela 3-1: Tecnologias de capacitores.....	72
Tabela 3-2: Quanto ao tipo de conversor	103
Tabela 3-3: Quanto a configuração	103
Tabela 3-4: Quanto ao sistema de suprimento de energia.....	103
Tabela 3-5: Quanto ao número de níveis	103
Tabela 3-6: Seleção dos filtros ativos para aplicações específicas.....	104
Tabela 4-1: Dados técnicos do transformador.....	117
Tabela 4-2: Parâmetros da concessionária de energia	118
Tabela 4-3: Valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S	119
Tabela 4-4: Potências reativas para correção do fator de potência em kVAr.....	122
Tabela 4-5: Componentes harmônicas presentes no secundário do transformador	128

Tabela 4-6: Tensão, corrente e distorções na barra analisada	131
Tabela 4-7: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada	131
Tabela 4-8: Tensão, corrente e distorções na barra analisada	136
Tabela 4-9: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada	136
Tabela 4-10: Tensão, corrente e distorções na barra analisada	141
Tabela 4-11: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada	142
Tabela 4-12: Tensão, corrente e distorções na barra analisada	154
Tabela 4-13: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada	155
Tabela 4-14: Potência reativa fornecida pelos filtros ativos	159
Tabela 4-15: Tensão, corrente e distorções na barra analisada	162
Tabela 4-16: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada	162
Tabela 4-17: Tensão, corrente e distorções na barra analisada	166
Tabela 4-18: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada	166
Tabela 4-19: Custos típicos de bancos de capacitores puros	167
Tabela 4-20: Custos típicos de filtros dessintonizados.....	168
Tabela 4-21: Custos típicos de filtros dessintonizados.....	168
Tabela 4-22: Custos típicos de filtros harmônicos ativos	169
Tabela 4-23: Quadro comparativo dos casos simulados.....	169
Tabela 5-1: Valores estatísticos da tensão fase-fase antes da instalação dos filtros	176
Tabela 5-2: Valores estatísticos da tensão fase-fase após instalação dos filtros....	176
Tabela 5-3: Valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S antes da instalação dos filtros.....	179
Tabela 5-4: Valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S após instalação dos filtros.....	180

LISTA DE SÍMBOLOS

cc	-Corrente contínua;
DTT	- Distorção harmônica total de tensão
DTI	- Distorção harmônica total de corrente
V_h	- Tensão harmônica de ordem h
I_h	- Corrente harmônica de ordem h
V_1	- Tensão fundamental
I_1	- Corrente fundamental
h	- Ordem harmônica
DIT	- Distorção harmônica individual de tensão
DII	- Distorção harmônica individual de corrente
PAC	- Ponto de acoplamento comum
ASD	- Acionamento de Velocidade Variável
RCT	- Reator controlado a tiristor
RNS	- Reator a núcleo saturado
P	- Potência ativa
Q	- Potência reativa
D	- Potência de distorção
S_1	- Potência aparente para a frequência fundamental
S	- Potência aparente
ca	- Corrente alternada
Icc	- Corrente de curto circuito
Ic	- Corrente fundamental de carga
FD	- Fator de dessintonia
Fr	- Frequência de ressonância
TJB	- Transistor de junção bipolar
MOSFET	-Transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico
FAP	- Filtro ativo de potência

GTO	- Gate turn-off thyristor
IGBT	- Transistor bipolar de porta isolada
DSP	- Processador de sinal digital
CSI	- Ponte inversora alimentada por fonte de corrente
VSI	- Ponte inversora alimentada por fonte de tensão
IGCT	- Tiristor comutado porta integrado
FA	- Fator de atenuação

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o passar dos tempos, as preocupações com os diversos temas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica têm sido cada vez mais comuns às empresas de energia elétrica e aos consumidores em geral, e vêm assumindo importância destacada nos cenários nacional e internacional [1].

Cargas e equipamentos de características não-lineares dos sistemas elétricos de potência, genericamente designadas por cargas elétricas especiais, geram correntes distorcidas que possuem elevado conteúdo harmônico. Essas correntes, sendo injetadas nas redes elétricas e nas instalações industriais adjacentes, poderão causar problemas diversos. Os problemas relativos ao desempenho e à vida útil dos equipamentos dependem, dentre outros fatores, da severidade das distorções e do nível de suportabilidade dos equipamentos.

Diante deste cenário, vários grupos de estudos especializados na área da Qualidade da Energia Elétrica, tanto no Brasil quanto no exterior têm se esforçado na elaboração de normas que limitem os níveis máximos das distorções harmônicas nos sistemas. Dentre as publicações internacionais consideradas de maior aceitação, pode-se citar os termos e definições propostos pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [2]. No Brasil,

atualmente tem-se como referência os termos e definições propostos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através do PRODIST [3] que propõe valores para a distorção harmônica de tensão no sistema de distribuição e para a rede básica de energia o operador nacional do sistema (ONS) estabelece desde 2002 parâmetros de qualidade para a tensão suprida.

Quanto aos limites de consumo e geração de reativos nos sistemas, também existem parâmetros pré-fixados e recomendados por organismos reguladores e exigidos pelas concessionárias de energia elétrica. No cenário nacional, estes parâmetros são estipulados pela resolução normativa nº 414/2010 da ANEEL, citada na referência [4].

O atendimento a esses limites e critérios exige estudos cuidadosos. Dentre outros, destacam-se aqueles envolvendo a modelagem das cargas e dos sistemas, cálculos de penetração harmônica, a especificação e o projeto de medidas corretivas, dentre as quais destacam-se os filtros harmônicos, assunto principal do presente trabalho.

Para a mitigação dos problemas relacionados às harmônicas, existem atualmente vários tipos de filtros, sendo destaque neste trabalho os filtros harmônicos passivos sintonizados e o filtro harmônico ativo. O filtro harmônico passivo sintonizado é uma solução antiga e tem sido utilizada, há tempos, em grandes instalações industriais, sistemas de transmissão e distribuição ou, ainda, em subestações conversoras para transmissão de corrente contínua (CC). Já o filtro harmônico ativo, apesar de ser uma tecnologia mais recente, vem ganhando cada vez mais destaque, seja no uso isolado no sistema elétrico ou em conjunto com filtros passivos [5].

Filtros passivos formados principalmente por elementos capacitivos e/ou indutivos foram inicialmente e, até hoje, são usados para redução de componentes harmônicos no sistema, além do uso de capacitores para correção do fator de potência. Suas principais vantagens são: (i) simplicidade, (ii) baixo custo e (iii) bom rendimento. Entretanto filtros passivos possuem algumas

desvantagens como: (i) grande volume dos componentes; (i) influência direta da impedância da fonte e; (iii) no caso, de bancos capacitivos apresentam susceptibilidade a ressonâncias (quando há presença de harmônicos no sistema), podendo causar operação indesejada em equipamentos de proteção (fusíveis de bancos capacitivos) e algumas cargas [6].

O desenvolvimento da tecnologia dos filtros ativos de potência (FAP's), sendo estes, equipamentos que apresentam uma melhor resposta dinâmica se comparado aos filtros passivos e, além disso, podem ser devidamente ajustados para realizar as requeridas compensações em amplitude e fase desejadas [7].

Dentro deste contexto, apesar das vantagens apresentadas pelos filtros passivos e ativos, deve-se lembrar que tanto o filtro passivo quanto o filtro ativo possuem características técnicas diferentes de aplicação em campo e amplas formas de especificação de acordo com cada sistema a ser instalado. Estas diferenças se refletem diretamente no custo final de cada solução.

Tendo estes pontos em evidência, no presente trabalho buscou-se realizar de maneira prática uma comparação técnica e econômica entre equipamentos mitigadores de harmônicos e compensadores de energia reativa. Na busca de uma melhor solução para um estudo de caso, são apresentadas as várias características de cada equipamento e as conseqüentes de sua inserção no sistema estudado. Os custos finais de cada solução são comparados juntamente com os resultados obtidos nos estudos realizados.

1.2 ESTADO DA ARTE

Existem algumas publicações relacionadas a comparação de desempenho e custos de filtros harmônicos. No entanto, na maioria destas publicações compararam-se os filtros harmônicos passivos sintonizados e amortecidos,

devido ao fato destes serem muito utilizados na correção de problemas harmônicos não apenas no passado, como também nos dias atuais.

Na década de 90, os filtros ativos começaram a ser utilizados, tendo como principal vantagem a atenuação das correntes harmônicas de forma contínua e flexível. Desde então, pesquisadores da área da eletrônica de potência, controle e de sistemas de potência vem buscando melhorar cada vez mais o desempenho destes equipamentos.

Diante desta nova tecnologia e de sua crescente evolução, estudos comparativos entre estes e os equipamentos até então utilizados para correção de problemas harmônicos se torna necessária, a fim de apresentar a aplicabilidade, vantagens e desvantagens tanto dos filtros ativos quanto dos filtros passivos.

A referência [8] apresenta alguns tipos de filtros passivos e ativos. Resultados da implementação em laboratório de dois tipos de filtros ativos são apresentados. Potencialidades do uso destes filtros em algumas áreas do sistema de energia são descritos. Finalmente, vantagens e desvantagens destes filtros são discutidas.

Em [9] e [10], tem-se uma análise e comparação dos filtros harmônicos passivos e ativos no sistema de distribuição. Em [9], algumas considerações de projeto são discutidas e alguns resultados experimentais são incluídos. Em [10], os resultados mostraram que o filtro ativo pode atenuar simultaneamente várias frequências enquanto o filtro passivo filtra apenas uma harmônica individual. Além disso, o percentual de redução para amplitude de corrente harmônica e distorção harmônica total obtida com o filtro harmônico ativo são comparados com os do filtro passivo. Este mostra também que a forma de onda senoidal da corrente no sistema de distribuição filtrado por um filtro ativo é melhor, comparada com o filtro passivo.

O trabalho [11] apresenta tipos de filtros ativos e passivos e o propósito da aplicação destes no sistema. As investigações e comparações dos resultados

das simulações revelaram a habilidade de compensação harmônica natural dos filtros passivos e o preciso controle dos filtros ativos.

A referência [12] propõe a operação paralela de um filtro ativo híbrido com um filtro passivo ou capacitores. As características do sistema combinado são analisadas e simuladas. A simulação resulta que bom desempenho pode ser obtido com o sistema combinado.

Em [13] apresenta-se um estudo de caso comparando o desempenho e custo dos filtros de correntes harmônicas, passivos e ativos. Realizou-se um estudo de fluxo harmônico destes equipamentos em uma planta industrial de uma mineradora, comparando os níveis de distorção harmônica total. Além disso, comparou-se os custos de implementação de cada equipamento.

A referência [14] realiza um estudo de filtros harmônicos para aplicações industriais que necessitam de filtragem harmônica e compensação reativa. Os resultados dos testes provaram que a tecnologia dos filtros ativos tem potencial para resolver a maioria dos problemas relatos de harmônicos no sistema industrial de baixa tensão.

O trabalho [15] investiga a operação paralela do filtro ativo e filtro passivo em um sistema com conteúdo de corrente harmônica. Observa-se que, a combinação paralela dos filtros ativos e passivos pode operar independentemente, e também que um filtro ativo pode atuar em várias frequências harmônicas. Resultados de simulação apresentaram que o fator de potência é corrigido pelo filtro passivo, harmônicos são minimizados por ambos, filtro ativo e passivo, e sobrecarga do sistema pode ser evitada.

Em [16], é feito uma comparação do desempenho da filtragem entre os filtros ativo paralelo puro e híbrido. Simulações computacionais são realizadas entre os filtros. Os resultados das simulações indicam efetividade e viabilidade do filtro híbrido. Além disso, análise teórica confirma a validade dos resultados simulados.

A referência [17] investiga a efetividade de aplicar diferentes técnicas de mitigação para reduzir a corrente e a distorção harmônica de tensão produzida por ASD's. Problemas de ressonância ocorreram com o filtro passivo. O filtro ativo foi mais atrativo devido a sua dinâmica, porém, sensível a distorção de tensão onde é conectado.

O trabalho [18] testa as performances dos filtros passivo e híbrido sob condições de alta distorção de tensão e corrente. Analisando os dados experimentais de tensão e corrente no domínio do tempo e da frequência, uma performance comparativa entre os filtros é feita. Os resultados demonstraram que com algumas diferenças, os modelos de filtros construídos reduziram convenientemente o conteúdo harmônico total e melhorou o fator de potência.

A referência [19] apresenta 22 configurações de filtros para compensação de cargas não lineares. Suas vantagens são discutidas e demonstradas por análise, simulações e experimentos. Além disso, uma comparação compreensiva de todas as configurações é feita em termos de reativo requerido, custo, desempenho e controle.

Alguns outros trabalhos realizaram estudos comparativos entre filtros passivos sintonizados e amortecidos. Investigação na seleção da topologia para aplicações [20], potencialidades e limitações [21], comparação de desempenho e de suportabilidade [22] e análise técnico-econômica [23] são temas abordados por estes trabalhos que tiveram como enfoque o estudo entre os filtros passivos sintonizados e amortecidos.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

Observado o presente estágio de desenvolvimento em que se encontra a área de concentração do tema escolhido para os trabalhos de investigação desta

dissertação, as atividades desenvolvidas e os resultados atingidos por esta pesquisa permitem ressaltar as seguintes contribuições:

- Apresenta uma metodologia de estudo e análise técnica-comercial na busca de soluções para mitigar harmônicos e compensar energia reativa.
- Relatos das harmônicas típicas presentes em uma empresa do segmento de telefonia, assim como, o percentual de distorção harmônica total de tensão e corrente.

Através de medições práticas realizadas na empresa de telefonia apresentadas em um estudo de caso é possível se ter informações dos percentuais de harmônicos presentes em empresa do mesmo segmento. Estes dados dão uma orientação para projetistas que se depararem com empresas similares, subsidiando bases para projeto de instalação de filtros harmônicos;

- Consequências sem a devida observância do emprego de banco de capacitores puro em sistemas com alto conteúdo harmônico devido à ocorrência de ressonância;
- Aplicação de banco de capacitores, filtro harmônico passivo dessintonizado, filtro harmônico passivo sintonizado, filtro harmônico ativo e filtro harmônico híbrido, na atenuação de harmônicos indesejáveis no sistema analisado;
- Verificação de que atualmente, soluções de mitigação de harmônicos utilizando filtros ativos ou mesmo filtros híbridos podem possuir custos bem próximos aos dos filtros passivos;
- Efeitos positivos decorrentes da aplicação de filtros harmônicos passivos sintonizados, mesmo em sistemas elétricos fortemente desequilibrados.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo introdutório, designado por Capítulo I, este trabalho encontra-se assim estruturado:

Capítulo II CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma abordagem sobre o estado da arte dos fenômenos associados às harmônicas em sistemas de energia elétrica. De modo geral são feitas reflexões sobre os harmônicos e seus efeitos, as cargas atuais geradoras de harmônicos, normas existentes e correção de fator de potência. Estes conceitos têm o objetivo de demonstrar a importância do tema deste trabalho no contexto atual.

Capítulo III FILTROS HARMÔNICOS

Neste capítulo será feita a conceituação e abordagem de capacitores, filtro harmônico passivo sintonizado, filtro harmônico passivo dessintonizado, filtro harmônico ativo e filtro harmônico híbrido para atendimentos dos objetivos desta dissertação.

Capítulo IV SIMULAÇÃO DIGITAL E COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE FILTROS

Neste capítulo, o desempenho de cada um dos equipamentos citados no capítulo III serão simulados e analisados através de estudo de caso real. No estudo, o foco será o desempenho técnico de cada um dos equipamentos, sendo que serão comparados os resultados obtidos e seus respectivos custos de aplicação. Os seguintes aspectos técnicos serão avaliados: tensão eficaz, corrente eficaz, distorção harmônica total de tensão (DTT), distorção harmônica total de corrente (DTI), curvas de impedância x frequência, potências ativa, reativa, aparente, de distorção harmônica e fator de potência.

Capítulo V RESULTADO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS FILTROS PASSIVOS

Neste capítulo, apresenta-se o desempenho prático do filtro harmônico passivo sintonizado, considerado como o equipamento mais viável. Neste estudo experimental, será analisado principalmente o desempenho do equipamento frente às características do sistema. As principais informações referentes à qualidade da energia serão apresentadas.

Capítulo VI CONCLUSÕES GERAIS

Finalmente este capítulo tem por objetivo apresentar as principais discussões e conclusões finais dos capítulos que formam essa dissertação. Além disso, serão ressaltadas as principais contribuições deste trabalho e proposições de futuros temas de investigação sobre o tema aqui focado.

Capítulo VII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma abordagem sobre o estado da arte dos fenômenos associados às harmônicas em sistemas de energia elétrica. De modo geral são feitas reflexões sobre os harmônicos e seus efeitos, as cargas atuais geradoras de harmônicos, normas existentes e correção de fator de potência. Estes conceitos dão uma visão geral sobre os harmônicos e mostram a importância do tema deste trabalho no contexto atual da operação dos sistemas elétricos de potência.

2.2 CONCEITUAÇÃO DE HARMÔNICAS

Dentre as metas a serem alcançadas por uma concessionária de energia, destaca-se a qualidade de fornecimento de energia aos consumidores industriais. Em condições ideais esta energia deve ser fornecida com uma tensão puramente senoidal, com frequência e amplitude constante. Entretanto, constata-se na

prática desvios significativo daquilo que seria o ideal. Estas distorções no padrão de tensão têm sido registradas durante todos os anos de uso da corrente alternada e têm sido atribuídas aos diversos componentes elétricos com características não-lineares comumente conectados a toda e qualquer rede elétrica. Uma carga não linear é aquela na qual a corrente não é proporcional a tensão aplicada.

A distorção de uma tensão ou corrente é analisada matematicamente, através dos estudos das ondas não senoidais periódicas (análise de Fourier). Quando uma forma de onda distorcida possui ciclos idênticos, pode ser decomposta em ondas senoidais puras em que a frequência de cada senóide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. Estas múltiplas são chamadas harmônicas da fundamental, por esse motivo são comumente chamadas “harmônicas”. A soma de senóides (Fundamental + Harmônicas) é definida pela série de Fourier.

Devido a suas propriedades, o conceito da série de Fourier é aplicado universalmente em análises de problemas harmônicos. O sistema pode ser analisado separadamente em cada harmônica. Além disso, a conclusão da resposta do sistema como senóides de cada frequência harmônica individualmente é muito mais simples comparada com toda a forma de onda distorcida.

A determinação dos ângulos de fase de cada uma das componentes harmônicas também é de fundamental importância, pois com esses dados, é possível determinar se em um PAC (Ponto de Acoplamento Comum) a distorção harmônica é aumentada ou diminuída, e ainda, a direcionalidade da harmônica para fins de responsabilidade técnica sobre as causas dos problemas com harmônicas. Ou seja, em um barramento onde várias cargas estão conectadas, conhecendo-se a amplitude e a fase de cada harmônica, é possível determinar qual é a carga geradora daquela distorção no ponto em questão e quais medidas de mitigação devem ser tomadas.

2.3 QUANTIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS

Dentre os diferentes procedimentos utilizados para se calcular o conteúdo harmônico de uma forma de onda, o mais utilizado é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensão como para correntes. As equações 2.1 e 2.2 expressam tais definições [23].

$$DTT_{(\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.1)$$

$$DTI_{(\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.2)$$

onde:

- $DTT_{(\%)}$ - Distorção harmônica total de tensão
- $DTI_{(\%)}$ - Distorção harmônica total de corrente
- V_h - Tensão harmônica de ordem h
- I_h - Corrente harmônica de ordem h
- V_1 – Tensão fundamental medida
- I_1 – Corrente fundamental medida
- h – Ordem harmônica

Para a quantificação da distorção individual de tensão ou corrente, ou seja, a porcentagem de determinada componente harmônica em relação a sua componente fundamental, a “Distorção Harmônica Individual” é utilizada. As equações 2.3 e 2.4 expressam tais definições.

$$DIT_{h(\%)} = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.3)$$

$$DII_{h(\%)} = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (2.4)$$

onde:

- $DIT_{h(\%)}$ - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
- $DII_{h(\%)}$ - Distorção harmônica individual de corrente de ordem h

2.4 HARMÔNICOS EM TERMOS DE COMPONENTES SIMÉTRICOS

Reconhecendo que as redes elétricas e as cargas não lineares são, em sua maioria, trifásicas, o tratamento elétrico para os sinais de tensões e correntes devem ser suficientemente abrangente para atender as condições equilibradas e desequilibradas de operação. Neste sentido, é amplamente conhecido que qualquer sistema de três fasores desbalanceados pode ser representado através de três conjuntos de fasores balanceados, conforme a seguir:

- *Componentes de sequência positiva*: conjunto de 3 fasores defasados de 120°, com rotação de fase ABC;
- *Componentes de sequência negativa*: conjunto de 3 fasores defasados de 120°, com rotação de fase ACB;
- *Componentes de sequência zero*: conjunto de 3 fasores em fase.

A figura 2.1 ilustra o exposto.

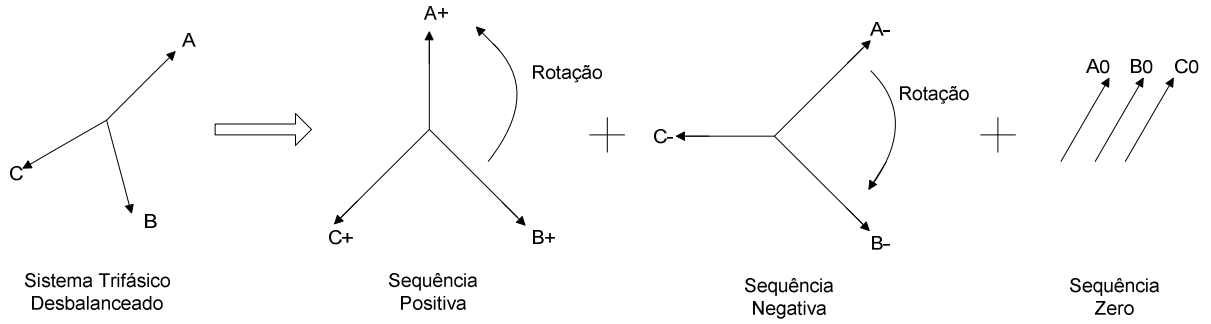


Figura 2.1- Decomposição em componentes simétricas.

Considerando um sistema elétrico trifásico balanceado e distorcido, as correntes em cada fase, e suas respectivas componentes harmônicas de ordens ímpares, podem ser genericamente expressas por:

$$i_a(\omega t) = I_1 \sin(\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + I_5 \sin(5\omega t) + I_7 \sin(7\omega t) + \dots \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} i_b(\omega t) = & I_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + I_3 \sin(3\omega t - 360^\circ) \\ & + I_5 \sin(5\omega t + 120^\circ) \\ & + I_7 \sin(7\omega t - 120^\circ) + I_9 \sin(9\omega t - 360^\circ) + \dots \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} i_c(\omega t) = & I_1 \sin(\omega t + 120^\circ) + I_3 \sin(3\omega t + 360^\circ) \\ & + I_5 \sin(5\omega t - 120^\circ) \\ & + I_7 \sin(7\omega t + 120^\circ) + I_9 \sin(9\omega t + 360^\circ) + \dots \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde:

- $i_a(\omega t), i_b(\omega t), i_c(\omega t)$ – corrente harmônica instantânea em cada fase
- $I_1, I_3, I_5, \dots, I_h$ - valor máximo da corrente harmônica de ordem 1, 3, 5, ...n.

A partir das equações acima se conclui que, cada componente harmônica apresenta uma característica própria em relação à sequência de fase da componente fundamental.

Abaixo é apresentada cada ordem harmônica com sua correspondente sequência de fase.

Fundamental (1º harmônico)	=>	Sequência (+)
2º Harmônico	=>	Sequência (-)
3º Harmônico	=>	Sequência (0)
4º Harmônico	=>	Sequência (+)
5º Harmônico	=>	Sequência (-)
6º Harmônico	=>	Sequência (0)
7º Harmônico	=>	Sequência (+)
8º Harmônico	=>	Sequência (-)
9º Harmônico	=>	Sequência (0)
e assim sucessivamente...		

A importância de se conhecer a sequência de fases de cada ordem harmônica deve-se ao fato que os princípios de funcionamento dos equipamentos de compensação harmônica, bem como o comportamento das harmônicas de sequência zero, fundamentam-se nas propriedades acima apresentadas [24].

2.5 FONTES HARMÔNICAS

Para muitos engenheiros, as distorções harmônicas são os mais importantes problemas de qualidade da energia elétrica de um sistema elétrico.

Isto justifica o grande interesse sobre o tema harmônico e a quantidade de trabalhos realizados sobre o assunto.

O número de cargas não lineares instaladas no sistema vem crescendo a cada dia, tanto no setor industrial como nos setores comercial e residencial. Além destes equipamentos serem os produtores de harmônicos no sistema, estes se mostram cada vez mais sensíveis aos harmônicos, ou seja, são dois fatos que agravam os problemas causados pelos harmônicos.

No comércio tal como escritórios, lojas, hospitais, call centers, entre outros, estão dominados por cargas não lineares como lâmpadas fluorescentes de alta eficiência, com reatores eletrônicos, controladores de velocidade para aquecimento, ventilação e ar condicionados, e equipamentos eletrônicos sensíveis alimentados por fontes de alimentação monofásicas chaveadas. Cargas comerciais são caracterizadas por um grande número de pequenas cargas produtoras de harmônicos. Dependendo da diversidade dos diferentes tipos de cargas, as correntes harmônicas produzidas por cada equipamento de acordo com o ângulo de fase podem se somar ou cancelarem uma com a outra. O nível de distorção de tensão depende da impedância do circuito e da distorção harmônica de corrente total. Quando capacitores de correção de fator de potência não são utilizados no comércio, a impedância do circuito é dominada pelo transformador alimentador de entrada e impedâncias dos condutores. Portanto, a distorção de tensão pode ser estimada simplesmente multiplicando a corrente pelas impedâncias destas ajustadas pela frequência.

Modernas técnicas industriais são caracterizadas por aplicação de cargas não lineares através da eletrônica de potência. Estas cargas podem representar uma porção significativa da carga total e injetam correntes harmônicas no sistema de energia, causando distorção harmônica na tensão. Um exemplo disto são os acionamentos dos motores de indução, que representam grande parte da carga industrial, através de inversores e chaves soft-starter. Em muitas

aplicações, os tradicionais fornos siderúrgicos, cujo combustível primário era o óleo foram substituídos por fornos elétricos a arco voltaico, fornos de indução de alta frequência, todos com forte geração de harmônicos.

Este problema harmônico é agravado pelo fato de que estas cargas não lineares possuem um fator de potência relativamente baixo. Instalações industriais frequentemente utilizam bancos de capacitores para melhorar o fator de potência e evitar a tarifação por excesso de reativo. A aplicação de capacitores para correção do fator de potência pode potencialmente aumentar a magnitude das correntes harmônicas geradas pelas cargas não lineares, causadas por um fenômeno denominado ressonância entre o capacitor e o sistema elétrico.

Sabe-se que, em geral, a impedância do sistema $Z_s(h)$, por ser de característica indutiva, cresce com a frequência, enquanto que a reatância dos bancos de capacitores $X_c(h)$ decresce com a frequência. Nestas condições, pode acontecer a hipótese em que $Z_s(h)$ e $X_c(h)$ possuam módulos semelhantes. Isto poderá refletir no surgimento de um valor, às vezes altamente proibitivo, para a tensão $V(h)$. Esse fenômeno é conhecido como ressonância paralela. Ao aumento exagerado da tensão diz-se que ocorreu uma amplificação da tensão. Este assunto (ressonância) será abordado com mais detalhes ainda neste capítulo.

O aumento do nível de distorção de tensão usualmente ocorre nos barramentos das instalações de baixa ou média tensão onde os capacitores são aplicados. Condições de ressonância causam sobrecarga nos capacitores, motores e transformadores, além de má operação de equipamentos eletrônicos sensíveis.

No setor das concessionárias de energia, outros exemplos de geração de harmônicos podem ser citados, dentre eles destacam-se: a substituição do tradicional compensador síncrono de reativos pelos modernos compensadores

estáticos do tipo: reator controlado a tiristor (RCT), reator a núcleo saturado (RNS), etc.

Por outro lado, o setor residencial também tem contribuído para a geração de harmônico. Lâmpadas fluorescentes compactas estão sendo cada vez mais utilizadas, as máquinas de lavar estão sendo substituídas por versões eletrônicas mais eficientes, as geladeiras antigas por geladeiras que possuem alguma eletrônica envolvida no controle de temperatura. Novos aparelhos eletrodomésticos eletrônicos, como microcomputadores, impressoras, videocassetes, DVDs e videogames estão se tornando cargas mais frequentes, e utilizam fontes chaveadas que permitem alimentar estes aparelhos com tensões variando de 90 a 240 volts, gerando harmônicos significativos na corrente.

Diante do exposto, considerando os diversos tipos de cargas especiais, estas podem ser classificadas, de um modo geral, em dois grupos em função de seus níveis de tensão:

Grupo I: Nível de transmissão e ou subtransmissão

Enquadram-se neste grupo, as seguintes cargas não lineares:

- Conversores estáticos;
- Reatores controlados à tiristores;
- Reatores à núcleo saturado;
- Fornos a arco;
- Laminadores;
- Sistemas de tração ferroviária;
- Grandes motores de indução com inversores de frequência e/ou soft-starters.

Grupo I I: Nível de distribuição e/ou consumidores finais

- Fontes chaveadas;
- Sistemas “NO-BREAK’S ou “UPS”;
- Acionamento de velocidade variável – “ASD”;
- Lâmpadas de descarga. (fluorescente, vapor de mercúrio e mista);
- Fornos de indução alta frequência;
- Inversores de frequência;
- Soft-starters;
- Controles eletrônicos de temperatura, iluminação, etc.;
- Máquinas de solda;
- Etc.

2.6 EFEITOS IMPORTANTES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Os componentes de sistemas elétricos têm a sua capacidade de transporte, fornecimento ou utilização da potência elétrica, limitada pela temperatura máxima que cada componente pode suportar. A tensão de alimentação determina o nível de isolamento de cada componente e a corrente absorvida pela carga define a sua temperatura de operação. Por essa razão as distorções de tensão e de corrente em sistemas elétricos provocam sobrecargas e o consequente aumento de temperatura desses componentes.

De uma maneira geral, os efeitos das distorções podem ser divididos nos seguintes grandes grupos [5], [25], [26]:

- Solicitação de isolamento associada às distorções de tensões;
- Solicitação térmica, devido à circulação de correntes harmônicas;
- Operação indevida de diversas naturezas;

- Interferências em sistemas de comunicação (principalmente sinais de rádio).

2.6.1 Efeitos sobre a resistência dos condutores elétricos

Um condutor percorrido por uma corrente elétrica fica submetido a dois fenômenos: o efeito pelicular ou “skin” e o efeito de proximidade. O resultado é o aumento das perdas elétricas nos condutores. Estes fenômenos existem à frequência industrial, no entanto com o aumento da frequência os efeitos destes fenômenos nos condutores elétricos se tornam mais apreciáveis.

De uma forma geral, os seguintes efeitos são constatados:

- Variação da resistência com a frequência;
- Acréscimo das perdas no cabo;
- Aumento da temperatura;
- Com a sobrecarga térmica devido às distorções harmônicas, teremos a diminuição da vida útil do cabo;
- Aumento da resistência devido harmônicos provoca uma atenuação nos efeitos de ressonância (efeito de amortecimento).

2.6.2 Efeitos sobre os motores de indução

Em um motor de indução percorrido por correntes harmônicas observa-se o aparecimento de torques oscilatórios devido à interação destas correntes harmônicas e o campo magnético de frequência fundamental. Estes torques podem levar a problemas de vibrações mecânicas para o motor e carga acionada.

Por outro lado, os harmônicos podem influenciar sobre as perdas no ferro e no cobre. Pode-se afirmar que os motores de indução quando submetidos a alimentações distorcidas, passam a experimentar maiores dissipações térmicas e consequentes sobreaquecimentos. Este aumento da temperatura interna do motor ocasiona a redução da vida útil do isolamento dos enrolamentos do mesmo. Este aumento das perdas elétricas em função da distorção harmônica total de tensão pode ser verificado na figura 2.1.

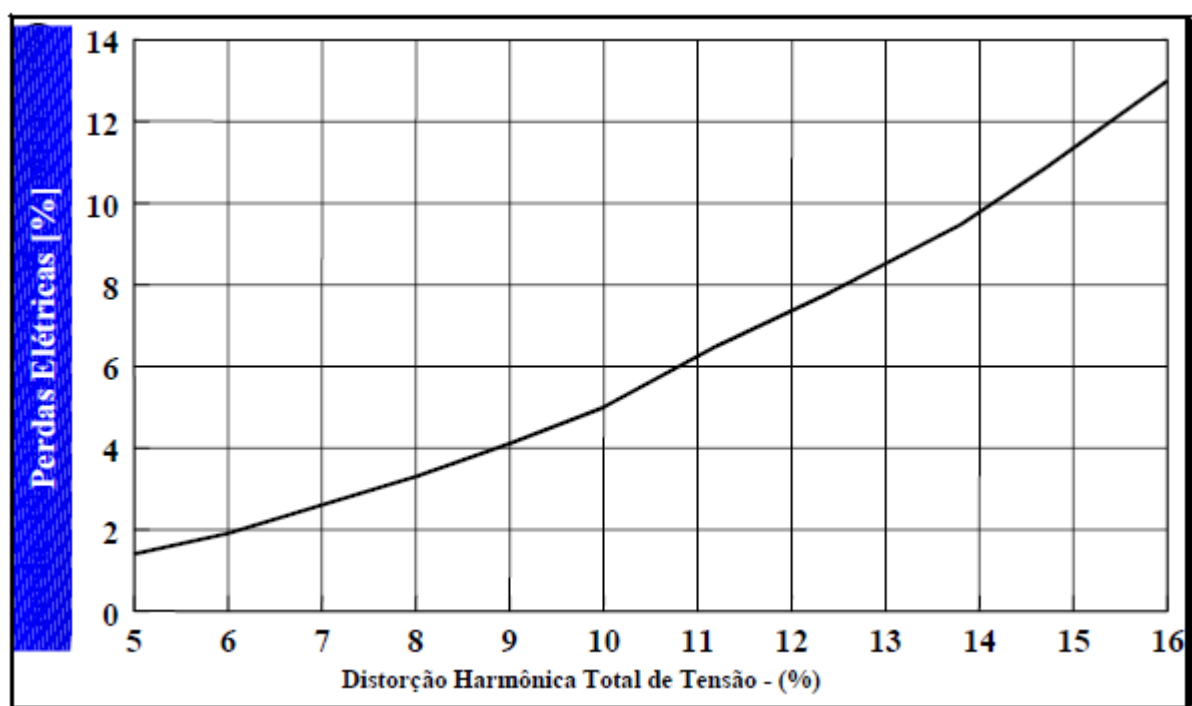


Figura 2.2- Acréscimo nas perdas elétricas do motor de indução em função da distorção harmônica total de tensão de alimentação.

Resumindo, os motores de indução, quando submetidos a tensões distorcidas, poderão apresentar problemas operacionais como: alterações das condições de partida, alteração dos pontos de operação em regime permanente, variações do torque médio e aparecimento de torques oscilatórios ou vibrações.

2.6.3 Efeitos sobre as máquinas síncronas

Os efeitos globais dos harmônicos sobre a operação das máquinas síncronas são semelhantes àqueles comentados para as de indução. As perdas suplementares no ferro ou no cobre são, como anteriormente, pequenas para o estator, sendo que a parcela mais significativa encontra-se no rotor.

As máquinas síncronas apresentam uma complicação adicional (em termos de aquecimento devido aos harmônicos afetando o rotor) que aparece através da interação entre pares de harmônicos de mesma frequência no rotor. Por exemplo, a 5ª e 7ª harmônica induzem no rotor corrente de frequência igual a seis vezes a da fundamental. Estas correntes criam, por sua vez, campos rotóricos de velocidade igual a seis vezes a velocidade síncrona, porém, em direções opostas. Sem dúvida, estas correntes serão responsáveis por um acréscimo das perdas na superfície do rotor.

De uma forma resumida, pode-se citar os seguintes efeitos de harmônicos nas máquinas síncronas:

- A presença de correntes harmônicas no estator é responsável pela produção de um fluxo harmônico girante. O sentido de rotação deste fluxo pode ser concordante ou discordante à velocidade síncrona da máquina;
- Semelhantemente ao motor de indução, as perdas no ferro são pouco alteradas na presença de harmônicos;

2.6.4 Efeitos sobre transformadores

Um dos principais efeitos das componentes harmônicas em transformadores se manifesta na forma de sobreaquecimento devido ao aumento

das perdas Joule e no ferro (Histerese e Focault). O efeito pelicular e de proximidade também estão presentes nos transformadores. Além destes, a presença de sinais distorcidos intensifica as fugas tradicionalmente manifestadas nos isolamentos, e este efeito, também resulta numa diminuição da vida útil do equipamento. Na figura 2.3 verifica-se um exemplo dessa diminuição do tempo de vida útil do transformador em função da distorção harmônica total de corrente. Outro fato importante nos transformadores na presença das distorções harmônicas é o fenômeno denominado e conhecido na literatura com derating, que resulta na redução do carregamento do transformador, para que sua vida útil seja preservada [24, 25].

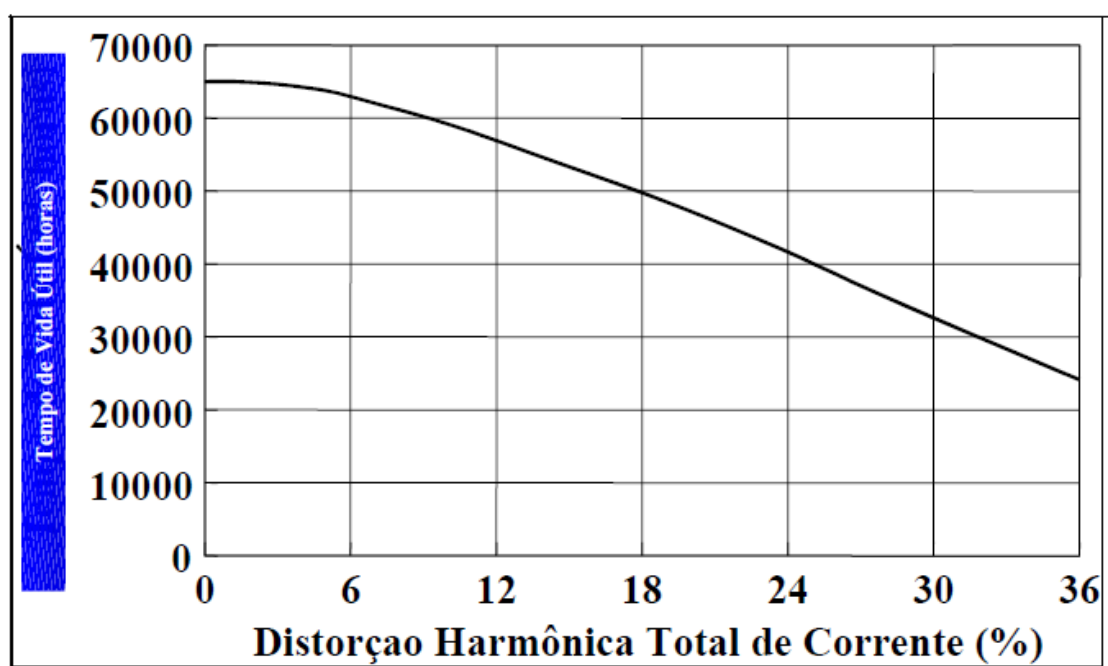


Figura 2.3- Redução da vida útil do transformador em função da distorção harmônica a que é submetido.

Além das distorções harmônicas presentes no transformador, as correntes contínuas são uma forma de distorção de onda para as quais normalmente não se reserva certa importância. Quando a carga é tal que correntes contínuas podem fluir nos enrolamentos dos transformadores pode-se ter como resultado um

sobreaquecimento. Estas correntes contínuas causam saturação no núcleo, resultando num substancial aumento da corrente de excitação do transformador e consequente aumento das perdas no núcleo [24].

2.6.5 Efeitos sobre capacitores de potência

Um capacitor submetido a um sinal de tensão distorcido tem o campo elétrico entre as placas alterado, o qual, sofrendo acréscimos em magnitude e frequência, poderá resultar até mesmo no rompimento do dielétrico. Com isto, a corrente de fuga é substancialmente incrementada, o que implica em intensificações das descargas parciais e, conseqüentemente, a deterioração do dielétrico.

Alem disso, as correntes harmônicas nos bancos de capacitores provocam um sobreaquecimento nos condutores e conexões entre as unidades capacitivas. Verifica-se também um aumento das perdas nos resistores dos cabos internos, contatos, filme condutor, resistor de descarga e aumento das perdas dielétricas. Outro efeito é a fadiga do isolamento devido aos maiores valores da tensão de pico da tensão devido às distorções. Estes efeitos resultam na diminuição da vida útil do capacitor.

2.6.6 Ressonâncias

Os sistemas elétricos que possuem cargas indutivas e capacitores podem ter uma ou mais frequências nas quais a impedância equivalente vista de um determinado ponto do sistema, pode ser mínima ou máxima.

2.6.6.1 Ressonância série

A figura 2.4(a) mostra uma situação em que um transformador (com reatância X_t) encontra-se em série com um banco de capacitor de reatância X_C , instalado para correção do fator de potência. A reatância indutiva do transformador cresce com a frequência, enquanto que a reatância capacitiva do banco de capacitores decresce com a frequência. A figura 2.4(b) ilustra o circuito elétrico equivalente deste sistema.

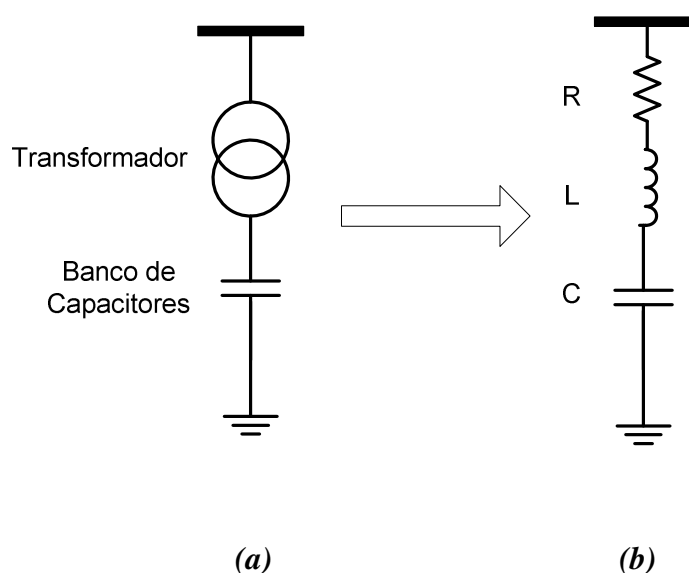


Figura 2.4- Circuito série.

(a) Diagrama unifilar de um sistema elétrico típico;

(b) Representação circuital do diagrama unifilar.

Nessas condições, este circuito elétrico indica que existe uma ressonância série entre a reatância indutiva do transformador e a reatância capacitiva do capacitor. A equação 2.8 indica qual é a frequência de ressonância série.

$$f_s = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_t}} \quad (2.8)$$

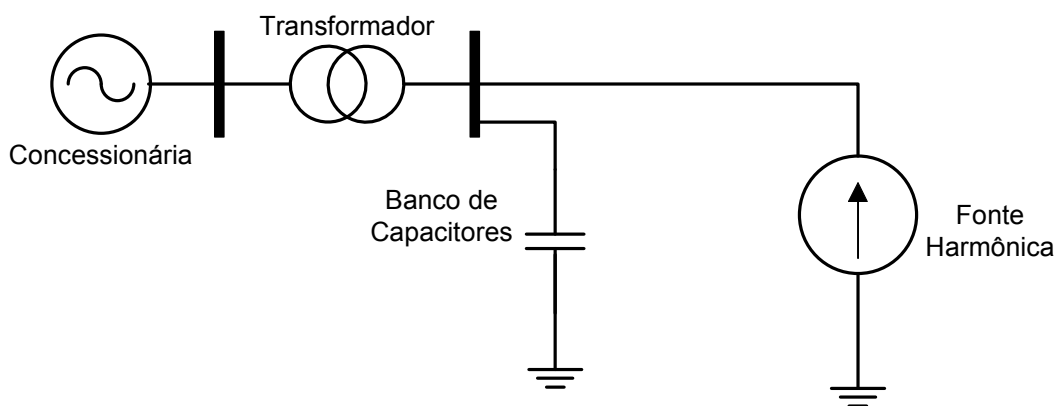
onde:

- f_s – Frequência de ressonância série;
- f_1 – Frequência fundamental.

Em consequência de uma ressonância série, altas correntes harmônicas circulam no capacitor e no transformador.

2.6.6.2 Ressonância paralela

À título de ilustração, a figura 2.5(a) mostra um sistema elétrico onde um gerador alimenta uma fonte harmônica através de um transformador. No ponto de acoplamento (PAC) entre a fonte harmônica e o transformador, há um capacitor instalado para correção de fator de potência. A figura 2.5(b) ilustra o circuito elétrico equivalente deste sistema.



(a)

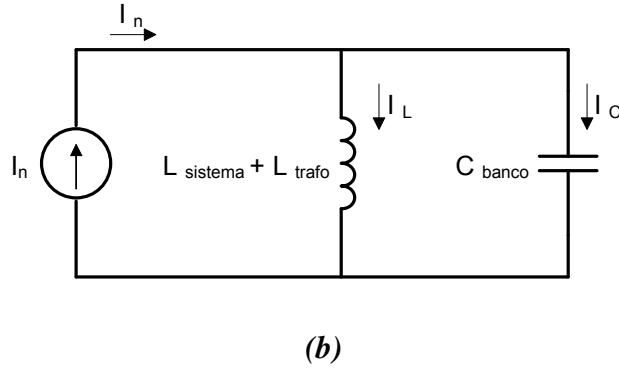


Figura 2.5 – Circuito paralelo:
(a) Diagrama unifilar de um sistema elétrico típico;
(b) Representação circuitual do diagrama unifilar.

A impedância harmônica equivalente do circuito RLC paralelo é dado por:

$$Z(h)_{eq} = \frac{(jX(h)_{trafo} + jX(h)_{sist}) \cdot (-jX(h)_{cap})}{(jX(h)_{trafo} + jX(h)_{sist}) - jX(h)_{cap}} \quad (2.9)$$

onde:

- $X(h)_{cap}$ – Reatância do capacitor, na frequência de ordem h ;
- $X(h)_{sist}$ – Reatância do sistema elétrico, na frequência de ordem h ;
- $X(h)_{trafo}$ – Reatância do transformador, na frequência de ordem h .

A ressonância paralela pode ocorrer se, na equação 2.9, o resultado da soma das impedâncias do denominador fornecer um número muito pequeno. Isso causará uma impedância equivalente muito grande. Assim, qualquer pequeno valor de corrente harmônica multiplicado por esta grande impedância, poderá resultar, em um elevado valor para a tensão harmônica. Esta tensão,

somada com a tensão fundamental, poderá proporcionar uma tensão resultante muito alta no ponto de acoplamento comum (PAC) e que poderá até danificar o banco de capacitores.

Diante disto, a equação que especifica a frequência em que haverá ressonância paralela é (2.10):

$$f_p = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_c}{X_s + X_t}} \quad (2.10)$$

onde:

- X_c – Reatância do capacitor, na frequência fundamental;
- X_s – Reatância do sistema elétrico, na frequência fundamental;
- X_t – Reatância do transformador, na frequência fundamental.

2.6.7 Efeitos sobre medidores de energia elétrica

Outro tipo de efeito das distorções harmônicas é o mau funcionamento dos dispositivos de medição de energia. A influência dos harmônicos de tensão nos medidores utilizados pode implicar em erros expressivos nos resultados das medições, os quais, em muitos casos, superam as faixas de precisão dos instrumentos.

O torque produzido no medidor de energia do tipo indução é definido pela tensão de alimentação e a corrente de carga, assim, quando da presença de distorções harmônicas na tensão ou corrente, o disco do medidor poderá acelerar ou retardar sua velocidade. Este comportamento dependerá do fluxo harmônico existente no local de instalação do medidor.

Por outro lado, os medidores eletrônicos também são afetados pelos harmônicos individualmente em maior ou menor escala conforme a magnitude e a frequência injetada. O comportamento destes medidores é dependente das formas de onda de corrente e de tensão, podendo apresentar resultados com desvios acima de suas classes de exatidão.

Dentre estes tipos de medidores, estudos revelam que os sistemas de medição eletrônicos vêm se apresentando como a melhor alternativa para os propósitos de medição [27]. Compreendendo, no entanto, que os parâmetros estabelecidos por norma necessitam de revisões para garantir a exatidão dos medidores submetidos a ondas de tensão e corrente não senoidais.

2.7 FATOR DE POTÊNCIA

Um dos modelos de cálculo de potências e fator de potência mais aceitos na engenharia, sob condições não senoidais, é o modelo de Budeanu. Fundamentado no domínio da frequência, o modelo consiste, basicamente, em desmembrar a potência aparente em três componentes de potência, P , Q e D (potência de distorção). Sendo assim, o triângulo de potências sofre uma alteração, recebendo uma terceira dimensão provocada pela potência aparente necessária para sustentar a distorção da frequência fundamental, conforme mostra a figura 2.6.

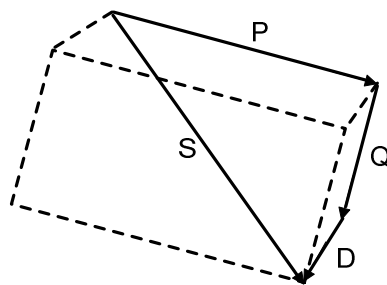


Figura 2.6- Diagrama de potências segundo modelo de Budeanu.

2.7.1 Fator de potência real

O fator de potência real leva em considerações a defasagem entre a corrente e a tensão, os ângulos de defasagem de cada harmônica e a potência reativa para produzi-las. Seu valor é sempre menor que o fator de potência de deslocamento sendo que a correção deverá ser feita pelo fator de potência real.

As medidas do fator de potência devem ser feitas por equipamentos especiais. Os instrumentos convencionais tipo bancada ou alicate, são projetados para medir formas de onda senoidal pura, ou seja, sem nenhuma distorção. Porém, deve-se admitir que, atualmente, são poucas as instalações que não tem distorção significativa. Sendo assim, os instrumentos de medida devem indicar o valor RMS verdadeiro.

2.7.2 Fator de potência de deslocamento

O fator de potência de deslocamento considera apenas a defasagem entre a corrente e a tensão na frequência fundamental. Em regime permanente senoidal o fator de potência é entendido como sendo um fator que representa o

quanto da potência aparente é transformada em potência ativa (cobrado pela concessionária).

O conceito de fator de potência é compreendido, erroneamente, por muitos, como o cosseno do ângulo de deslocamento entre tensão e corrente. O fator de deslocamento somente será numericamente igual ao fator de potência real se as formas de onda de tensão e corrente forem perfeitamente senoidais, sem distorção harmônica alguma, ou seja, somente para cargas totalmente lineares. Esta é uma questão hipotética impossível e inexistente nos sistemas elétricos em geral atuais. Em todos os setores industrial, comercial e residencial, significativa quantidade de cargas elétricas não lineares leva o sistema a conviver com formas de onda de corrente distorcidas, com significativas taxas de distorção harmônica. Esta distorção harmônica pode resultar em significativa energia reativa em circulação pelo sistema elétrico, e, conseqüentemente o fator de potência será reduzido. Portanto, fator de potência tem apenas uma definição, e, sempre que houver distorção harmônica na corrente e até mesmo na tensão, jamais será igual ao fator de deslocamento.

Por outro lado, há de se lembrar ainda que, caso existam harmônicos de mesma ordem tanto na tensão quanto na corrente, haverá ainda potência ativa consumida proveniente destes harmônicos, mesmo em cargas puramente resistivas, quando as mesmas forem alimentadas por estas tensões e correntes distorcidas.

Quanto à correção do fator de potência, uma vez que o conceito está de maneira geral mal entendido, infelizmente o conceito nacional de correção de fator de potência é a instalação de banco de capacitores, comutados ou não. Entretanto, estes bancos de capacitores, corrigem o ângulo de deslocamento entre as fundamentais de tensão e corrente do sistema, ou seja, existindo elevado conteúdo harmônico na corrente este sistema não é eficaz. Aliás, além de

ineficiente em termos energéticos nestes casos, poderá resultar em problemas como: ocorrência de ressonâncias, como mencionado anteriormente.

2.7.3 Cálculo do fator de potência com harmônicas

O fator de potência é definido pela relação da potência real (ativa) pela potência aparente [28]. Portanto,

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \times \frac{1}{\sqrt{1 + DTT^2} \times \sqrt{1 + DTI^2}} = fp_{desl} \times fp_{dist} \quad (2.11)$$

$$fp_{desl} = \frac{P}{S_1} \quad (2.12)$$

$$fp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + DTT^2} \times \sqrt{1 + DTI^2}} = \frac{V_{1,rms}}{V_{rms}} \times \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} = \frac{S_1}{S} \quad (2.13)$$

$$P = \sum_{n=1}^n V_n \times I_n \times \cos \phi_n \quad (2.14)$$

$$Q = \sum_{n=1}^n V_n \times I_n \times \sin \phi_n \quad (2.15)$$

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^n V_n^2 \times \sum_{n=1}^n I_n^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.16)$$

onde:

- fp_{desl} – Fator de potência de deslocamento;
- fp_{dist} – Fator de potência de distorção;
- DTT - Distorção harmônica total de tensão;
- DTI - Distorção harmônica total de corrente;
- $V_{1,rms}$ – Valor eficaz da Tensão fundamental;
- $I_{1,rms}$ – Valor eficaz da Corrente fundamental;
- P – Potência ativa;
- Q – Potência reativa;
- D – Potência de distorção;
- S_1 – Potência aparente para a frequência fundamental;
- S – Potência aparente;

Analisando a fórmula acima, verifica-se que um fator de potência unitário será somente possível com senóides puras. Neste caso, o fator de distorção seria igual a um e restaria apenas o fator de deslocamento. De forma geral, é importante ter o conhecimento de que em uma forma de onda distorcida o fator de potência será menor que o fator de potência de uma onda senoidal pura.

Fica claro, através dos conceitos mencionados, a importância de se levar em conta os efeitos das distorções harmônicas principalmente no cálculo do fator de potência. Desta forma, evitar-se-á que um baixo fator de potência seja mascarado por um valor alto, obtido através apenas das componentes fundamentais.

2.8 LEGISLAÇÃO

Existem algumas recomendações e normas no mundo que referenciam os limites para as distorções harmônicas individuais e totais no sistema elétrico. Dentre estes, os mais utilizados no Brasil são as recomendações da IEC que constituem-se nos fundamentos da grande maioria das normas, e a recomendação da IEEE Std 519 que constitui-se numa das mais conceituadas e referenciadas. Após publicação, a recomendação nacional elaborada pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) conhecida como PRODIST em seu Módulo 8 referencia os limites para as distorções harmônicas e provavelmente se tornará uma norma com consequentes penalizações. O PRODIST, ainda sob análise e aprimoramento, apresenta as recomendações para o DTT e DIT. Além disso, para a rede básica de energia o operador nacional do sistema (ONS) estabelece desde 2002 parâmetros de qualidade para a tensão suprida.

2.8.1 PRODIST

Após quase 10 anos em elaboração, foi publicado em dezembro de 2008 os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), um conjunto de diretrizes estabelecendo requisitos voltados a garantir a operação segura e eficiente e o acesso equânime aos sistemas de distribuição, a disciplinar os procedimentos relativos ao planejamento da expansão, à medição e à qualidade da energia, e a regulamentar o intercâmbio de informações entre os agentes e a ANEEL, além de outros objetivos.

Entre outros atributos, no módulo oito que o constitui dedica-se à qualidade da energia elétrica, contemplando fenômenos, até então ignorados na regulamentação setorial, relativos a perturbações de tensão, como harmônicos,

desequilíbrios, flutuações e variações de curta duração - a exemplo dos já onipresentes afundamentos.

Na tabela 2.1 é possível verificar os valores de referência para as distorções harmônicas totais de acordo com o PRODIST Módulo 8. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados em campo.

Tabela 2-1: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

TENSÃO NOMINAL DO BARRAMENTO	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO [%]
$V_N \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} \leq V_N \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_N \leq 138\text{kV}$	3

Outros indicadores tomados como referência são os valores das distorções harmônicas individuais, estes são subdivididos em três grupos: harmônicos ímpares não múltiplos de três (tabela 2.2), harmônicos ímpares múltiplos de três (tabela 2.3) e harmônicos pares (tabela 2.4).

Tabela 2-2: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

HARMÔNICAS ÍMPARES NÃO MÚLTIPLAS DE TRÊS [%]				
ORDEM HARMÔNICA	$V_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} \leq V_N \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} \leq V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_N \leq 230\text{kV}$
5	7,5	6	4,5	2,5
7	6,5	5	4	2
11	4,5	3,5	3	1,5
13	4	3	2,5	1,5
17	2,5	2	1,5	1
19	2	1,5	1,5	1
23	2	1,5	1,5	1
25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5

Tabela 2-3: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

HARMÔNICAS IMPARES MÚLTIPLAS DE TRÊS [%]				
ORDEM HARMÔNICA	$V_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} \leq V_N \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} \leq V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_N \leq 230\text{kV}$
3	6,5	5	4	2
9	2	1,5	1,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5
21	1	0,5	0,5	0,5
>21	1	0,5	0,5	0,5

Tabela 2-4: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

HARMÔNICAS PARES [%]				
ORDEM HARMÔNICA	$V_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} \leq V_N \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} \leq V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_N \leq 230\text{kV}$
2	2,5	2	1,5	1
4	1,5	1	1	0,5
6	1	0,5	0,5	0,5
8	1	0,5	0,5	0,5
10	1	0,5	0,5	0,5
12	1	0,5	0,5	0,5
>12	1	0,5	0,5	0,5

2.8.2 IEC

As recomendações IEC [29] [30] formam um conjunto de diretrizes, as quais, muito embora não tenham caráter de normalização, norteiam procedimentos para a grande maioria das normas consultadas. Quanto aos limites para harmônicos, as tabelas apresentadas têm por meta atender as exigências de conformidade e planejamento. As recomendações IEC, ainda, sugerem limites de emissão para correntes harmônicas produzidas por equipamentos com características não-lineares de baixa potência. No tocante a desequilíbrios, os documentos IEC oferecem, apenas, uma orientação quantitativa dos limites recomendados.

A IEC indica que o consumidor deve se responsabilizar em manter os limites de emissão de harmônicos no PAC dentro dos limites estabelecidos pela concessionária. A concessionária é responsável pelo controle global dos níveis de distorções. O consumidor e a concessionária devem cooperar quando necessário na identificação do método ótimo para reduzir as emissões de harmônicos. A escolha e projeto de tal redução são de responsabilidade do consumidor. Na tabela 2.5 é possível verificar os valores de referência para as distorções harmônicas totais de acordo com o IEC. Após esta, nas tabelas 2.6, 2.7 e 2.8 são apresentados os valores de referência para as distorções harmônicas individuais.

Tabela 2-5: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão [%]
BT ($V_n \leq 1\text{kV}$)	8
MT ($1\text{kV} \leq V_n \leq 35\text{kV}$)	6,5
AT ($35\text{kV} \leq V_n \leq 230\text{kV}$)	3
EAT ($230\text{kV} \leq V_n$)	3

Tabela 2-6: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

HARMÔNICAS IMPARES NÃO MÚLTIPLAS DE TRÊS [%]			
Ordem harmônica	BT	MT	AT – EAT
5	6	5	2
7	5	4	2
11	3,5	3	1,5
13	3	2,5	1,5
17	2	1,6	1
19	1,5	1,2	1
23	1,5	1,2	0,7
25	1,5	1,2	0,7
>25	0,2+1,3(25/h)	0,2+0,5 (25/h)	0,2+0,5x (25/h)

Tabela 2-7: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

HARMÔNICAS IMPARES MÚLTIPLAS DE TRÊS [%]			
Ordem harmônica	BT	MT	AT – EAT
3	5	4	2
9	1,5	1,2	1
15	0,3	0,3	0,3
21	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2

Tabela 2-8: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

HARMÔNICAS PARES [%]			
Ordem harmônica	BT	MT	AT – EAT
2	2	1,6	1,5
4	1	1	1
6	0,5	0,5	0,5
8	0,5	0,4	0,4
10	0,5	0,4	0,4
12	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2

2.8.3 IEEE

A norma IEEE Std 519, foi publicada em 1992, e determina os limites para os harmônicos de tensão nos sistemas de transmissão e distribuição e harmônicos de correntes com os sistemas de distribuição industrial. Estas recomendações práticas são usadas nos projetos de sistemas de energia com cargas não lineares. Os limites são usados para operação contínua e são recomendados para as piores condições.

Os limites de distorção de tensão recomendados podem ser vistos na tabela 2.9. Os limites listados nesta podem ser usados como valor de projeto do

sistema para o pior caso em operação normal. Para curtos períodos, durante partidas e condições não usuais, os limites podem ser excedidos por 50%.

Tabela 2-9: Limites de tensão harmônica

Tensão nominal do barramento	Distorção individual de tensão [%]	Distorção harmônica total de tensão [%]
$V_n \leq 69\text{kV}$	3	5
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$161\text{kV} < V_n$	1	1,5

Os limites de distorção de corrente assumem que haverá diversidades entre as harmônicas de correntes injetadas por diferentes consumidores. Estas diversidades podem ser componentes harmônicas diferentes, diferenças entre ângulos de fases ou diferenças nas harmônicas injetadas por tempo. Levando em consideração estas diversidades, os limites de correntes são determinados tal que a máxima frequência individual das harmônicas de tensão causadas por um único consumidor não excederá os limites na tabela 2.10 para sistemas que podem ser caracterizados por uma impedância de curto circuito.

Tabela 2-10: Bases para o limite de corrente harmônicas

Relação entre corrente de curto e máxima da carga no PAC	Máxima distorção harmônica de tensão individual [%]	Considerações relacionadas
10	2,5 – 3,0	Sistema dedicado
20	2,0 – 2,5	1-2 grandes consumidores
50	1,0 – 1,5	Poucos consumidores relativamente grandes
100	0,5 – 1,0	5-20 consumidores médios
1000	0,05 – 0,1	Muitos consumidores pequenos

As tabelas 2.11, 2.12 e 2.13 listam os limites de harmônicas de correntes baseado no tamanho da carga com o respectivo tamanho do sistema de potência em que a carga é conectada. A relação I_{cc}/I_c é a relação da corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum, para a máxima corrente fundamental da carga. Estas tabelas são divididas de acordo com os níveis de tensão do sistema.

Tabela 2-11: Limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição geral

120V ≤ V _n ≤ 69kV [%]						
I _{cc} /I _c	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabela 2-12: Limites de distorção de corrente para sistemas de sub-transmissão geral (entre 69kV e 161kV)

69kV ≤ V _n ≤ 161kV [%]						
I _{cc} /I _c	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	1,25	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Tabela 2-13: Limites de distorção de corrente para sistemas de transmissão geral (maior que 161kV), geração distribuída e co-geração

V _n > 161kV [%]						
I _{cc} /I _c	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	THD
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
>50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0

Os procedimentos na IEEE são destinados a limitar as correntes injetadas por consumidores e equipamentos individuais visando manter aceitáveis os

níveis de tensão harmônica em todo o sistema. Para consumidores individuais, a norma limita o nível da injeção de correntes harmônicas no PAC. A concessionária é responsável pela distorção harmônica de tensão no PAC.

2.9 SOLUÇÕES PARA A MITIGAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Várias técnicas de redução de harmônicos têm sido utilizadas para atender as regulamentações e recomendações impostas para as correntes harmônicas inseridas no sistema. Em geral estas técnicas podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- Filtros passivos conectados em paralelo e/ou série;
- Reator série na linha ca;
- Aumento da quantidade de pulsos em unidades conversoras, com o uso de transformadores defasadores;
- Técnicas de compensação de fluxo magnético;
- Filtros ativos de potência conectados em paralelo e/ou série;
- Dispositivos eletromagnéticos.

Entre estas alternativas, os filtros passivos, ativos e associação entre estes são comumente as mais empregadas. Devido a este fato, estas três metodologias serão mencionadas brevemente na sequência e serão consideradas com mais detalhes no próximo capítulo, sendo o foco deste trabalho.

Os filtros passivos são formados a partir de várias combinações dos elementos R, L e C, podendo ser conectados em paralelo ou em série ao sistema elétrico. Aqueles conectados em paralelo têm sido amplamente estudados e aplicados em sistemas elétricos. Por anos, devido ao custo benefício, o filtro passivo tem se mostrado a solução mais adequada para grande parte dos casos. Os filtros em derivação sintonizados utilizam-se do fenômeno da ressonância,

para que possua baixa impedância em uma ou mais frequências harmônicas a serem eliminadas. Nos filtros em derivação amortecidos os elementos são arrançados de modo que possuam uma baixa impedância ao longo de uma larga faixa de frequência. Na prática, são encontradas configurações que combinam a utilização de filtros sintonizados para ordens harmônicas individuais até determinada ordem e amortecidos para as frequências superiores. Um fator determinante dos filtros sintonizados e amortecidos é que, para as frequências abaixo da frequência de ressonância, apresentam-se como circuitos capacitivos, funcionando como compensadores de energia reativa na frequência fundamental.

O filtro ativo é um método relativamente novo para eliminação de correntes harmônicas. Estes filtros além de reduzir as correntes harmônicas melhoram a performance do sistema. Entretanto, eles são baseados em sofisticados componentes eletrônicos e são ainda mais caros que os filtros passivos. No filtro ativo a idéia básica é injetar no sistema magnitudes de harmônicos de corrente ou tensão igual aos gerados pelas cargas não lineares e defasamento de ângulo de fase de 180 graus para que elas sejam canceladas com as outras.

Por outro lado, tem-se a associação dos filtros passivos (série ou paralelo) com os ativos (série ou paralelo), chamados de filtros híbridos. Tais configurações têm como principal objetivo compensar as limitações de ambos os filtros ativos, série e paralelo, quando estes são implementados isolados. Os filtros ativos melhoram as características de filtragem dos filtros passivos, diminuindo a possibilidade do aparecimento de ressonâncias devido às variações na impedância da fonte, da carga ou ambas, além de diminuir os custos, pois requerem um conversor com menor potência.

2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo, de caráter informativo, foi desenvolvido no sentido de proporcionar uma visão geral a respeito das causas, efeitos e algumas soluções da presença de harmônicos no sistema, assim como também, da influência destes na compensação reativa.

Inicialmente foram apresentados os conceitos e quantificados os harmônicos. Também foram discutidas as principais fontes geradoras de harmônicos e os efeitos dos harmônicos nos principais equipamentos utilizados nas indústrias. Foram apresentados os cálculos do fator de potência na presença de harmônicos e a relação entre ambos, legislação atual dos harmônicos e algumas das soluções adotadas para os harmônicos.

Percebe-se através deste capítulo, a importância do estudo dos harmônicos. Além disso, é obtida uma base para o desenvolvimento e entendimento dos próximos capítulos.

CAPÍTULO III

FILTROS HARMÔNICOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante do apresentado no capítulo anterior, faz-se necessário a aplicação de medidas corretivas para mitigação / minimização das distorções harmônicas de tensão e / ou corrente nas redes elétricas.

Várias técnicas de redução de harmônicos podem ser utilizadas para eliminar os problemas harmônicos e melhorar a qualidade da energia elétrica. Dentre estas técnicas pode-se citar: alteração da carga geradora, alteração do sistema e instalação de equipamentos mitigadores de harmônicos.

A forma de redução de harmônicos utilizando a instalação de equipamentos é muito ampla. Além de existirem diversos tipos de equipamentos com tal finalidade, estes podem ser configurados de diversas formas. Para cada forma de utilização podem ser obtidos resultados diferentes.

Dentre os equipamentos atenuadores de harmônicos, os mais utilizados atualmente no mercado brasileiro são: filtros harmônicos sintonizados, filtros harmônicos dessintonizados, filtros harmônicos ativos e filtros harmônicos híbridos. Neste aspecto, pode-se destacar a utilização destes equipamentos,

sendo o foco deste trabalho e, portanto discutidos em maiores detalhes neste capítulo.

3.2 CAPACITORES DE POTÊNCIA

Sabe-se que os capacitores de potência são elementos estáticos cuja inserção em circuitos de transmissão e distribuição de energia elétrica tem o intuito de racionalizar o consumo de potência reativa a ser fornecida pela geração.

Devido aos parâmetros físicos impostos pela teoria de projeto, os capacitores de potência são dimensionados a partir de duas variantes primordiais [31]:

- a) Tensão de utilização: define a espessura do material dielétrico a ser utilizado na parte ativa do capacitor (entre placas), sendo portanto fator preponderante para a definição das características dimensionais do equipamento;
- b) Potência de serviço: define a área das folhas de material que compõem a parte ativa do capacitor (placa + dielétrico), que associada com a espessura do dielétrico, define o “volume capacitivo”, ou seja, as dimensões do tanque do capacitor.

Assim, a potência é formulada como:

$$Potência \approx Capacitância = k \times \frac{A}{e} \quad (3.1)$$

onde:

- A – Área das placas;
- e – Espessura do dielétrico (define a tensão de trabalho em regime permanente);

- k – Constante dielétrica do material entre placas;

E, o volume capacitivo como:

$$V = A \times e_t \quad (3.2)$$

onde:

- V – Volume da parte ativa do capacitor;
- A – Área das placas;
- e_t – Espessura do dielétrico + espessura das placas.

Desta forma, pode-se concluir que quanto menor for a potência (ou capacitância) de um capacitor, menor tende a ser seu volume, uma vez que as dimensões relativas à área de placas (área ativa ou área de posição ativa) é que determina o volume do capacitor.

Além disso, quanto maior for o poder de isolamento entre placas do capacitor (considerando a utilização de um mesmo tipo de material dielétrico), maior tende a ser a espessura do dielétrico, traduzindo também em um aumento de volume.

Qualquer tipo de capacitor elétrico tem sua parte ativa formada por duas placas (ou armaduras) de material condutor separadas por um material com características isolantes (dielétrico), conforme figura 3.1.

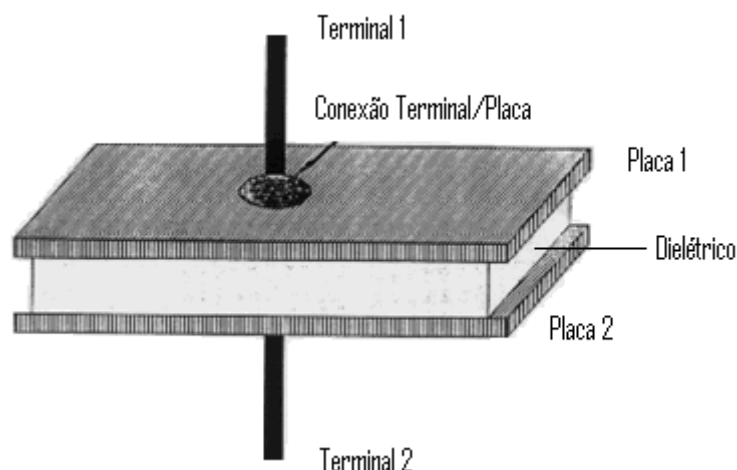


Figura 3.1- Representação do capacitor plano.

A propriedade de suportar tensão no capacitor é determinada pelo material utilizado na composição do dielétrico (tipo de isolante e espessura do mesmo). Para um determinado material isolante de características uniformes, quanto maior for a espessura do dielétrico, maior será sua capacidade de suportar tensão.

A propriedade de suportar corrente no capacitor é determinada pela quantidade das conexões condutor/placa e pelo tipo de material utilizado na composição das placas (tipo de condutor e espessura do mesmo). Logo, para um determinado material condutor de características uniforme, quanto maior for a espessura da placa, maior será a capacidade de conduzir corrente e prover melhor conexão com o terminal.

3.2.1 Principais tipos de capacitores

3.2.1.1 Capacitores PPM (Polipropileno Metalizado)

Em baixas tensões (≤ 1.000 V), a tecnologia mundial de fabricação de capacitores a seco e imerso em óleo utiliza na composição do dielétrico um filme de polipropileno como isolamento entre placas.

Cada filme de polipropileno possui em uma das suas superfícies uma fina película de metalização com liga de alumínio-zinco (AL/Zn) para compor uma das placas do capacitor. A utilização de mais de um filme de polipropileno fornece a outra placa do capacitor e serve como segundo dielétrico (duplo enrolamento), Figura 3.2.

Apesar da espessura do filme metalizado se situar entre 5 a 12 μm (para atender as tensões acima), são necessárias grandes áreas de placas para atingir potências significativas. Por razão de necessidades dimensionais utiliza-se normalmente um enrolamento (bobina) do conjunto placa mais dielétrico, para formar um capacitor básico, comumente chamado de elemento capacitivo ou bobina capacitiva.

Em condições adversas, os pontos de conexão elétrica do capacitor e suas placas tendem a apresentar pontos de auto-regeneração, ou seja, transição de estado do material da placa de condutor (Alumínio-Zinco) para isolante (Óxido de Alumínio ou Óxido de Zinco), diminuindo a potência da parte ativa.

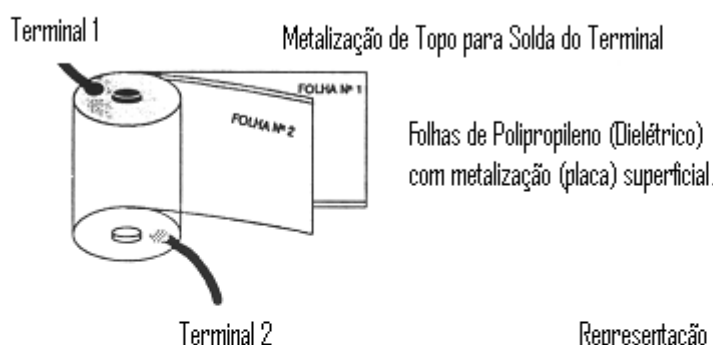
Para este tipo de situação da rede é recomendada a utilização de material dielétrico NÃO-PPM, com reforços no dielétrico e nas placas para permitir a operação em regime permanente, sem prejuízo da vida útil dos capacitores.

Também por razões de melhor aproveitamento de espaço, o capacitor trifásico é obtido a partir da associação em triângulo (ou estrela) de capacitores básicos. Entretanto, é seguro afirmar que as propriedades fundamentais do

capacitor são obtidas a partir da forma como o elemento capacitivo é dimensionado e fabricado.

O tipo de projeto acima detalhado é designado de capacitor em PPM (Polipropileno Metalizado), e atende à maioria das aplicações de baixa tensão atualmente. Tal capacitor é designado a seco quando o elemento capacitivo é colocado dentro de uma caneca envolto por uma resina endurecida, e imerso quando mergulhado em uma caneca envolto por óleo biodegradável visando melhorar a troca de calor do elemento com meio ambiente.

Exemplo de Elemento Capacitivo (Bobina) com
Dielétrico de Polipropileno Metalizado (PPM)



Representação Gráfica de uma Camada
do Enrolamento da Bobina Capacitiva



Figura 3.2- Capacitor com tecnologia PPM.

Entretanto, em situações onde existam condições adversas do sistema elétrico, tais como, surto de tensão, sobretensões de regime, correntes e tensões harmônicas significativas, alta temperatura ambiente, etc., é recomendável que

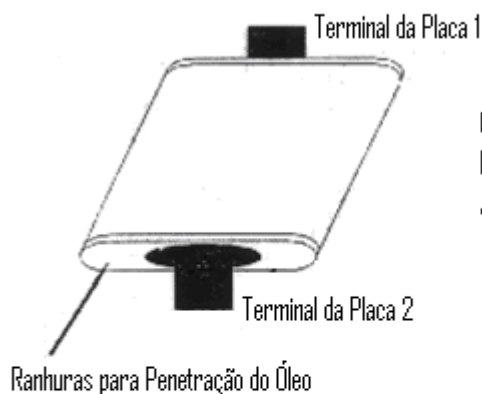
seja realizado estudo complementar sobre a viabilidade da aplicação deste tipo de projeto de capacitores, pois é provável uma grande diminuição da vida útil do equipamento submetido a essas condições operativas.

3.2.1.2 Capacitores NÃO-PPM

Os capacitores de potência impregnados em óleo para baixa tensão, com tecnologia NÃO-PPM, foram desenvolvidos baseados na tecnologia de capacitores de média tensão para aplicação em circuitos onde é desejada uma robustez dielétrica adicional, em virtude de condições adversas decorrentes das características própria do sistema, tais como, sobretensões periódicas ou de regime, surto de tensão, transitórios, harmônicos, etc.

Tais capacitores, devido a sua característica construtiva com a utilização de duas folhas de alumínio como placas condutoras e duas folhas de polipropileno e óleo biodegradável compondo o meio dielétrico, possuem uma suportabilidade muito superior aos problemas de sistema acima relatados, se comparados aos capacitores com tecnologia PPM, figura 3.3.

Exemplo de Elemento Capacitivo (Bobina) com
Dielétrico Duplo - Placa de Folha de Alumínio - Impregnado à óleo



Óleo Isolante que Preenche Totalmente o Capacitor e
Faz Parte do Dielétrico, Refrigerando as Placas e
Auxiliando a Isolação

Representação Gráfica de uma Camada
do Enrolamento da Bobina Capacitiva



Figura 3.3- Capacitor com tecnologia não PPM.

3.2.2 Comparativo técnico entre capacitores do tipo PPM e NÃO-PPM

Como visto anteriormente, os capacitores de potência utilizados para correção de fator de potência, são comumente fabricados com elementos constituídos por Polipropileno Metalizado (PPM) e não Polipropileno Metalizado (NÃO-PPM).

Devido às características de fabricação, os elementos formadores dos capacitores em PPM são cilíndricos, resultado do enrolamento de um par de

folhas de filme metalizado. Para garantir boas características técnicas no elemento, o enrolamento deve ser feito bem justo, para restringir a existência de ar e consequentemente oxidação das placas do capacitor.

O filme de Polipropileno Metalizado varia de 5 a 12 μm , dependendo da tensão nominal no capacitor, ao passo que a espessura da metalização do filme varia de 0,015 a 0,025 μm .

Os capacitores PPM podem ser fabricados a seco (elemento envolto em resina epóxi) ou imerso em óleo (elementos ficam com as superfícies externas imersas em óleo).

Alguns fabricantes de capacitores PPM impregnados, afirma que para que haja a impregnação, há a necessidade de espaço entre as placas condutoras e os filmes de polipropileno permitindo a penetração do óleo dielétrico, bem como a utilização de vácuo, o que não ocorre para este tipo de capacitor, como descrito anteriormente.

No caso destes capacitores PPM ditos imersos ou impregnados, o óleo dielétrico tem contato apenas com as partes externas dos elementos capacitivos, propiciando melhores condições térmicas nas regiões de contato elétrico e na superfície externa do elemento, otimizando somente a dissipação de calor dos mesmos.

Já os capacitores com tecnologia NÃO-PPM são fabricados com tecnologia e materiais totalmente diferentes do projeto PPM, utilizando dielétrico duplo (duas camadas), composto por folhas não metalizadas de papel Kraft Terlo (uma folha) e filme de polipropileno corrugado (uma folha); as placas dos capacitores são formadas por folhas de alumínio (e não por metalização), o que confere maior espessura para condução de corrente nos pontos críticos e maior suportabilidade térmica.

Os elementos formadores dos capacitores NÃO-PPM são enrolados com folga para garantir a boa impregnação de dielétrico e placas com óleo (o óleo

isolante é impregnado a vácuo nos elementos capacitivos fazendo parte efetiva do dielétrico, estando presente em todos os pontos internos do capacitor, e não somente nas superfícies externas dos elementos), conferindo grandes propriedades de dissipação de calor e excelente rigidez para o dielétrico. Resume-se a seguir algumas características técnicas básicas que diferenciam capacitores PPM e NÃO-PPM, conforme tabela 3.1 – Tecnologias de Capacitores.

Tabela 3-1: Tecnologias de capacitores

CARACTERÍSTICA	CAPACITOR PPM	CAPACITOR NÃO PPM	VANTAGEM NÃO PPM
Dielétrico (Tensão suportável)	01 camada de isolamento sem participação do óleo isolante na composição	02 camadas de folhas com participação do óleo isolante na composição	Dupla isolamento, maior tensão suportável, eliminação de descargas parciais pontuais
PLACAS (Capacidade de condução de corrente)	Placa (condutor) de espessura média igual a 0,02 μm	Placa (condutor) de espessura média igual a 5,0 μm	Capacidade de condução de corrente extremamente maior
ÓLEO (Dissipação de calor e eliminação de pontos de alto aquecimento)	Tem contato somente com as superfícies externas (não tem contato com placas e dielétrico)	Penetra totalmente nas placas e dielétrico	Melhor refrigeração do dielétrico e placas, eliminação de pontos quentes localizados

3.3 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS

Uma solução tradicionalmente utilizada para evitar o excesso no sistema elétrico de componentes harmônicas de corrente pode ser obtida através do uso de filtros passivos sintonizados. Conforme conceitos em circuitos elétricos, os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia

ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva. Para frequências menores que a frequência de sintonia eles são capacitivos e, para as frequências superiores àquela frequência são indutivos. Portanto, para a frequência fundamental (que sempre estará abaixo da frequência de sintonia), estes filtros podem operar como compensadores de reativo [32] [33] [34] [35].

3.3.1 O Circuito ressonante série

Seja um circuito elétrico formado por um resistor, um indutor e um capacitor, conectados em série e alimentados por uma fonte de tensão, conforme ilustra a figura 3.4. Ressonância série é uma condição na qual um circuito contendo pelo menos um indutor e um capacitor, apresentará uma impedância de entrada puramente resistiva.

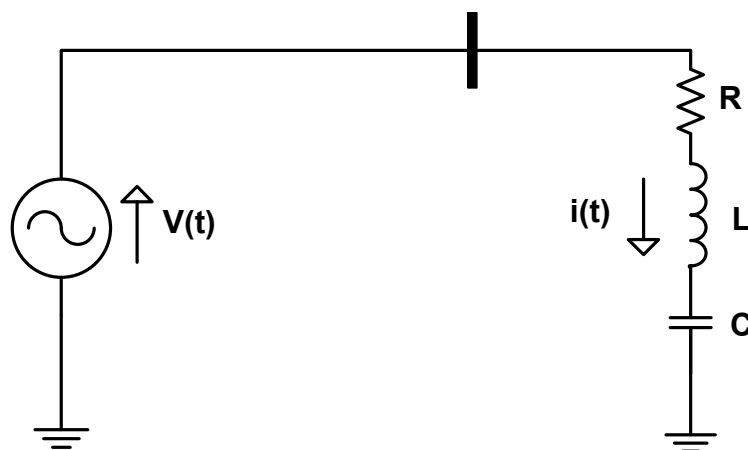


Figura 3.4- Diagrama de um circuito RLC série.

Aplicando-se o conceito de ressonância série ao circuito da figura 3.4, cuja impedância complexa é dada pela equação (3.3), observa-se que, ajustando-

se a frequência da fonte, existirá um valor de frequência em que esta impedância será puramente resistiva.

$$Z(\omega) = R + j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \quad (3.3)$$

onde:

- ω – Frequência angular da fonte de alimentação do sistema;
- R – Resistência indicada na figura 3.1;
- L – Indutância indicada na figura 3.1;
- C – Capacitância indicada na figura 3.1.

O módulo e a fase da impedância série da expressão (3.3) podem ser assim expressas, conforme equações (3.4) e (3.5), ou seja:

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2} \quad (3.4)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot L - 1/\omega \cdot C}{R} \right) \quad (3.5)$$

onde:

- $Z(\omega)$ – Módulo da impedância complexa dada por (3.3), em função da frequência ω ;
- $\phi(\omega)$ – Ângulo da impedância $Z(\omega)$, em função de ω .

A condição de ressonância, conforme estabelecida acima, aplicada à equação (3.3) possibilitará a determinação da frequência que anulará a parte imaginária de $Z(\omega)$:

$$\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) = 0 \quad (3.6)$$

Assim, explicitando-se a frequência ω na equação (3.6), obtém-se a frequência angular de ressonância do circuito série, que é dada por (3.7).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (3.7)$$

onde:

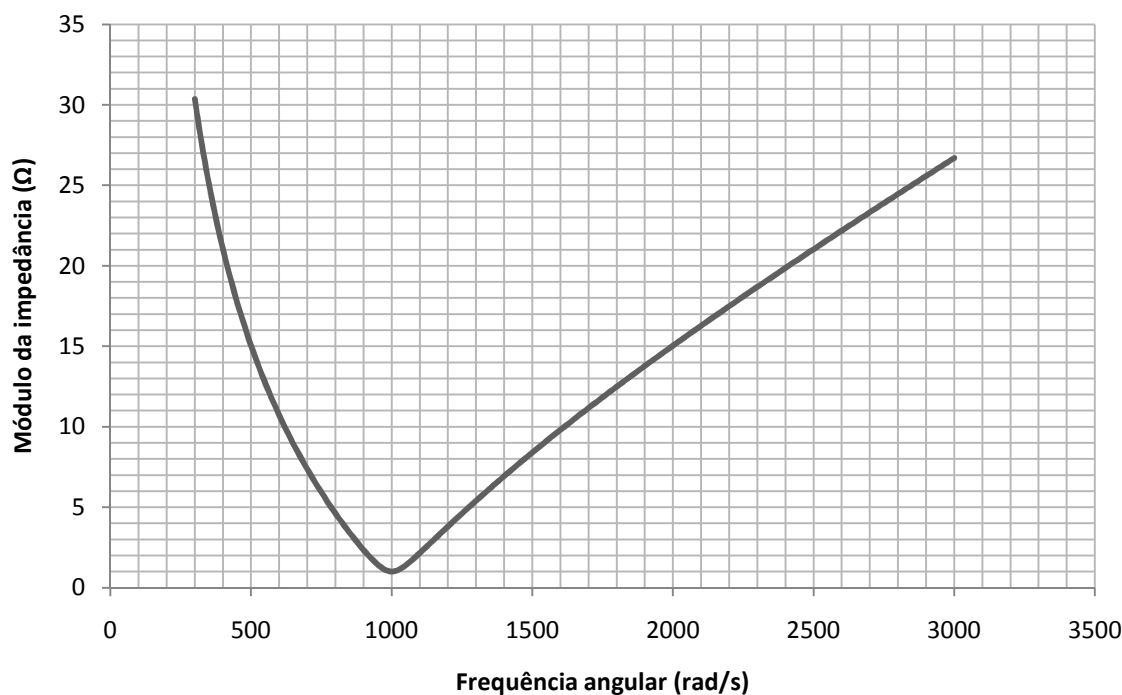
- ω_0 – Frequência angular de ressonância do circuito RLC.

Observa-se na equação (3.7) que ω_0 é função apenas dos parâmetros L e C do circuito. Portanto, esta frequência ω_0 é uma característica típica do circuito RLC série.

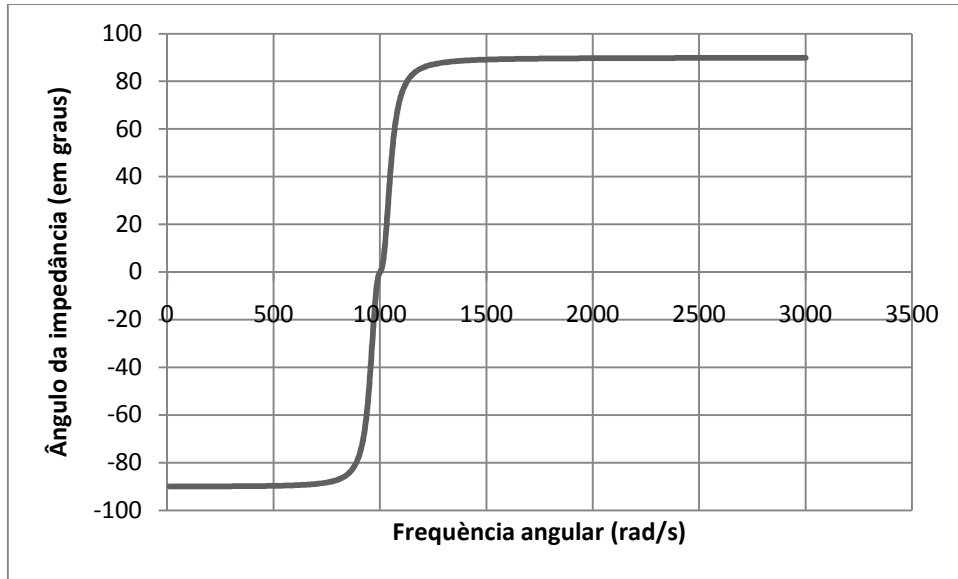
Esta condição está ilustrada na figura 3.5, onde se notam os comportamentos do módulo (figura 3.5 (a)) e o ângulo de fase (figura 3.5 (b)) da impedância do circuito da figura 3.4, para um dado circuito RLC série de resistência $R=1\Omega$, capacitância $C=100\mu F$ e indutância $L=10mH$, cuja frequência angular ressonante (ω) é 1000 rad/s.

Pela observação da figura 3.5(a) verifica-se que, na frequência de ressonância, a impedância é mínima. Por outro lado, da figura 3.5(b), conclui-se que o ângulo de $Z(\omega)$ anula-se para $\omega = \omega_0$. Este fato demonstra que, na

ressonância série, o circuito será puramente resistivo. Observa-se também que, aumentando-se a frequência além de ω_0 , os ângulos da impedância serão positivos e cada vez mais próximos de +90 graus. Isto implicará que a impedância será predominantemente indutiva nas altas frequências. Inversamente, para frequências baixas e inferiores à frequência de ressonância, o circuito será predominantemente capacitivo.



(a)



(b)

Figura 3.5 – Impedância de um circuito RLC série versus frequência.

(a) Módulo;

(b) Ângulo.

3.3.2 O fator de qualidade

O fator de qualidade é um parâmetro adimensional e de fundamental importância no dimensionamento do filtro passivo. Definido, tanto para circuitos como para componentes, através da relação entre a máxima energia armazenada nos componentes (reator ou capacitor) e a energia total dissipada (resistor) por período. O referido parâmetro, em geral, é expresso pelo símbolo Q .

Assim, considerando-se o circuito ressonante série da figura 3.5, pode-se expressar o fator de qualidade, à frequência de ressonância ω_0 , em função dos valores dos componentes, pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C \cdot R} \quad (3.8)$$

Na equação 3.8 observa-se o aparecimento de $\omega_0.L$ e $1/\omega_0.C$, cujas dimensões são de impedância e cujos módulos são iguais para um dado circuito ressonante. Estas grandezas representam a impedância natural do circuito, e aqui ela será designada por Z_0 conforme a expressão (3.9) a seguir. Ainda em (3.9) é mostrada outra expressão útil para Z_0 , unicamente em função dos componentes L e C :

$$Z_0 = \omega_0.L = \frac{1}{\omega_0.C} = \sqrt{L/C} \quad (3.9)$$

A partir das expressões (3.8) e (3.9) pode-se expressar o fator de qualidade Q em função dos componentes L , C e R do circuito, conforme mostra a equação (3.10), ou seja:

$$Q = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (3.10)$$

Vale ressaltar que é comum referir-se a fatores de qualidade de reatores, ou de capacitores, como elementos isolados. Nestes casos, os fatores de qualidade são referidos à frequência fundamental e a expressão aplicável será da forma da expressão (3.8) anterior.

3.3.3 Modelagem do filtro

O modelo de circuito equivalente monofásico de um filtro sintonizado a uma única frequência foi apresentado na figura 3.4. Ressalte-se que, na prática, as conexões destes filtros são trifásicas, em delta ou em estrela-isolada.

O módulo da impedância do circuito RLC série, dada na equação (3.4), pode também ser expresso como $Z_f(\omega)$, em função das frequências ω e ω_0 de sintonia e dos parâmetros Q e R . Assim, da equação (3.4), colocando-se em evidência a resistência R , obtém-se (3.11):

$$Z_f(\omega) = R \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot L}{R} - \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R} \right)^2} \quad (3.11)$$

Multiplicando-se, na equação (3.11), o numerador e o denominador de cada parcela dentro dos parênteses por ω_0 e, em seguida, introduzindo-se o fator Q , dado por (3.8), obtém-se a equação (3.12) do módulo da impedância do filtro, ou seja:

$$Z_f(\omega) = R \cdot \sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2} \quad (3.12)$$

A equação (3.12) é particularmente útil por permitir a visualização da influência do fator de qualidade sobre a seletividade do filtro sintonizado à frequências ω_0 . As curvas da figura 3.6, traçadas com base na equação (3.12), ilustram o efeito da variação de Q sobre a impedância do filtro sintonizado. Da

análise dessa figura conclui-se que, para um dado filtro e mantendo-se inalterada a resistência R , o aumento do fator Q provocará a elevação da impedância desse filtro para as frequências diferentes da frequência de sintonia. Concomitantemente, ainda baseando-se na equação (3.12), verifica-se que, na frequência de sintonia, a impedância do filtro será puramente resistiva e, para este caso, ela será independente do fator Q . Entretanto, é importante ressaltar, que esta condição de sintonia não será, necessariamente, observada na prática. Isto porque o filtro sintonizado estará sujeito ao fenômeno da dessintonização, comum nos sistemas elétricos reais.

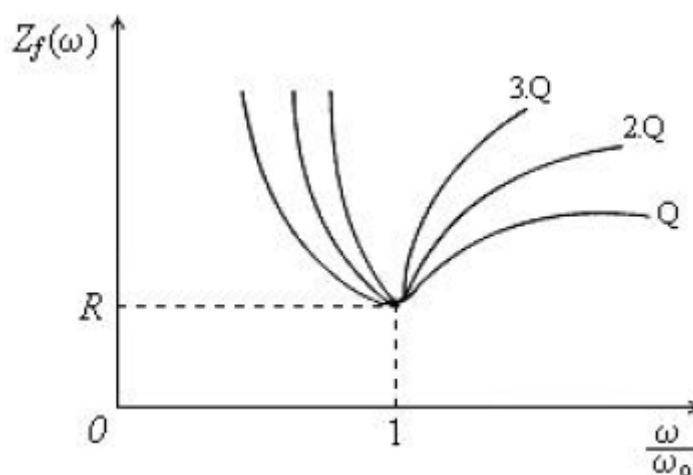


Figura 3.6- Impedância versus frequência, para diversos valores do fator Q .

Desse modo, o fator de qualidade dos filtros sintonizados é uma medida do grau de seletividade desses circuitos, quanto às frequências harmônicas. Assim, quanto maior for o fator Q mais seletivo será o filtro, ou seja, ele impedirá cada vez mais a absorção das correntes harmônicas de frequências diferentes daquela de sintonia. Os valores típicos dos fatores de qualidade de filtros sintonizados situam-se na faixa de 30 e 60.

Já para os reatores isolados, os fatores de qualidade usuais situam-se entre 50 e 150.

3.3.4 Dessintonização

Variações de frequência ocorrem em qualquer sistema elétrico devido às pequenas modificações de carga e geração. Nos sistemas elétricos reais, variações da ordem de $\pm 0,15\text{Hz}$ podem ser observadas.

Os filtros sintonizados, em especial, são sensíveis a estas variações que ocorrem na frequência do sistema elétrico, como também a quaisquer outros fatores que tenham alguma influência sobre os valores dos seus componentes. Assim, se um filtro sintonizado é dimensionado para ter uma impedância mínima para uma dada frequência, três fatores independentes contribuem para dessintonizar o circuito para a harmônica correspondente:

- Variação da frequência do sistema C.A.;
- Erro de sintonia inicial, devido ao reator do filtro (dada à própria característica discreta de seus enrolamentos) e também devido aos erros inerentes à medição;
- Variação da capacitância total, devido à variação da temperatura, ou devido à falha de um ou mais elementos de capacitor.

Os capacitores também têm seus valores modificados com o tempo de uso. Porém, as mudanças na capacitância com a temperatura são mais importantes.

A pior hipótese de dessintonização acontecerá quando todos os fatores descritos forem cumulativos. Para quantificar a dessintonização, designa-se a

grandeza denominada desvio equivalente de frequência (δ). Este desvio (δ), causado na frequência de sintonia, é identificado por meio de duas parcelas:

- Desvio relativo da frequência nominal do sistema (δ_s);
- Desvio relativo aos valores nominais dos componentes do filtro (devido às variações dos próprios componentes, δ_c).

Assim, o desvio equivalente de frequência será calculado pela adição das duas parcelas, δ_s e δ_c , conforme indica a equação (3.13):

$$\delta = \delta_s + \delta_c \quad (3.13)$$

A parcela correspondente às variações de frequência do próprio sistema elétrico (δ_s) é determinada diretamente pela aplicação da equação (3.14):

$$\delta_s = \frac{\Delta f}{f_{nom}} = \frac{\Delta f}{f_1} \quad (3.14)$$

onde:

- Δf – Variação de frequência, em hertz, ocorrida no sistema C.A;
- f_{nom} – Frequência nominal (ou frequência fundamental), em Hertz, do sistema C.A.

A segunda parcela do desvio equivalente de frequência (δ_c), é dada pela equação (3.15):

$$\delta_c = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (3.15)$$

onde:

- $\Delta L/L$ – Variação da indutância do filtro relativamente ao seu valor nominal;
- $\Delta C/C$ – Variação da capacitância do filtro relativamente ao seu valor nominal.

Assim, o desvio equivalente de frequência (equação (3.13)), com a substituição de (3.14) e (3.15), poderá ser determinado por (3.16), onde os variáveis de Δf , ΔL e ΔC encontram-se implícitas.

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_1} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (3.16)$$

3.3.5 Efeito da dessintonização sobre a impedância do filtro

No projeto de filtros, este afastamento da sintonia (a qual estão sujeitos todos os circuitos ressonantes), deverá ser rigorosamente considerado, sob pena de, em condições anormais, isto é, de dessintonização, os filtros serem incapazes de atender às especificações.

O desvio equivalente de frequência também pode ser expresso por (3.17).

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (3.17)$$

Explicitando-se ω em (3.17), tem-se:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 + \delta) \quad (3.18)$$

Da impedância complexa do circuito da figura 3.6, por substituição de ω (dada em (3.18)), obtém-se (3.19):

$$Z_f(\omega) = R + j \cdot \left(\omega_0 \cdot (1 + \delta) \cdot L - \frac{1}{\omega_0 \cdot (1 + \delta) \cdot C} \right) \quad (3.19)$$

Seguindo-se, substituem-se, em (3.19), os componentes L e C pelas relações em função de Q , ω_0 e R , obtidas de (3.19). Estas substituições resultarão na expressão da impedância do filtro sintonizado à frequência de sintonia, com dessintonização (3.20), como:

$$Z_f(\omega) = R \cdot \left[1 + j \cdot Q \cdot \delta \cdot \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right] \quad (3.20)$$

Para pequenos desvios de frequência ($\delta \ll 1$), o que corresponde aos valores práticos, a impedância do filtro pode ser aproximada pela equação (3.21):

$$Z_f(\omega) \cong R \cdot (1 + j \cdot 2 \cdot Q \cdot \delta) \quad (3.21)$$

Nota-se que a parte imaginária da impedância do filtro na sintonia depende do valor de δ , isto é, da dessintonização [32].

3.4 FILTROS PASSIVOS DESSINTONIZADOS

A filtragem dessintonizada com correção de fator de potência é o meio utilizado para evitar a ressonância entre o circuito LC formado pelo banco de capacitores e pelo transformador de potência mais próximo, causada por uma componente harmônica gerada pelas próprias cargas não lineares da instalação. Sem o filtro de dessintonia pode haver a ocorrência de ressonância e a circulação de uma alta corrente sobre os ramos do circuito do banco de capacitores e transformador, causando sobrecarga em ambos.

A correção de fator de potência por bancos de capacitores automáticos ou fixos com indutores de dessintonia é feita para evitar a ressonância do banco de capacitores com o sistema, evitando a queima e aumentando a vida útil do mesmo, também reduzimos consequentemente a amplificação dos níveis de harmônicos.

O filtro consiste na inserção de um reator em série com os capacitores, obtendo-se um circuito ressonante com uma frequência de ressonância para o qual o sistema oferece um caminho de baixa impedância e sintonizado abaixo da primeira harmônica existente [43]. Para o caso do retificador trifásico de seis pulsos, por exemplo, tem-se a quinta harmônica como primeira harmônica gerada existente. Ou seja, o filtro de dessintonia opera em ressonância abaixo da quinta harmônica. Porém, dependendo da frequência de dessintonia, mais ou menos harmônicas serão absorvidas pelos filtros.

O estudo prévio do sistema para o projeto envolve medição e simulação quando temos um nível de distorção total de tensão (DTT) elevado, o projeto

padrão de banco de capacitores com indutor de dessintonia geralmente trabalha com frequências de dessintonia padronizadas em, 160 Hz (FD=14%) – 226 Hz (FD=7%) - e especiais sob consulta a um fornecedor.

Dependendo do fator de dessintonia (FD) e da impedância do sistema, mais harmônicas serão absorvidas pelo conjunto banco de capacitor e indutor.

Quanto menor o fator de dessintonia maior é a frequência de ressonância entre o indutor e o capacitor (F_r), isso mostra que estamos mais próximo da harmônica característica do sistema. Então temos diferentes níveis absorção para a 5ª harmônica por exemplo.

O projeto do filtro harmônico dessintonizado visa primeiramente à correção do fator de potência em redes com elevado nível de distorção, como esse sistema é também um filtro, modificamos a característica de impedância do sistema evitando a ressonância e drenando mais ou menos correntes harmônicas.

Podem-se citar as seguintes principais vantagens dos filtros harmônicos dessintonizados:

- Evita ressonância com o sistema;
- Diminui o nível de distorção de tensão do sistema;
- Aumenta a vida útil do capacitor;
- Diminui o desgaste de componentes de manobra;
- Limita as harmônicas para um nível aceitável;
- Suporta sistema de controle automático.

3.5 FILTROS ATIVOS

O desenvolvimento da tecnologia dos Filtros Ativos de Potência (FAP's) vem ganhando cada vez mais destaque, seja no seu uso isoladamente no sistema

ou em conjunto com filtros passivos, sendo estes equipamentos que apresentam uma melhor resposta dinâmica se comparado aos filtros passivos e que, além disso, podem ser devidamente ajustados para realizar as requeridas compensações em amplitude e fase desejadas. O filtro ativo injeta no sistema magnitudes de harmônicos de corrente ou tensão igual aos gerados pelas cargas não lineares e defasamento de ângulo de fase de 180 graus para que elas sejam canceladas com as outras. De acordo com as particularidades do filtro ativo, este pode ser dimensionado para eliminar apenas determinadas ordens harmônicas principais ou reduzir igualmente e percentualmente cada componente harmônica presente [36, 37, 38, 39].

No estágio inicial tiristores, TJB's (transistores de junção bipolar) e MOSFET's (acrônimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico) foram usados para o desenvolvimento dos FAP's, mas recentemente uma nova tecnologia de dispositivos, tais como, os GTO's (gate turn-off thyristor) e IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor, ou transistor bipolar de porta isolada) são considerados dispositivos ideais para uso em FAP's.

Outro grande avanço, não só no desenvolvimento de FAP's, mas de outras tecnologias, resultou da revolução ocorrida na área de microeletrônica. Iniciando-se com o desenvolvimento de dispositivos analógicos e digitais discretos e posteriormente com o uso de microprocessadores, microcontroladores e processadores de sinais digitais (DSP's). Este último, possibilitando a implementação de algoritmos complexos em tempo real, para gerar referências necessárias a compensação, bem como o uso de diferentes técnicas de controle, tais como, controle proporcional integral (PI), lógica fuzzy, redes neurais e modos de deslizamento.

Com estes avanços verificados, os FAP's, atualmente, são capazes de oferecer um melhor desempenho, na compensação de determinados distúrbios

periódicos, tais como: harmônicos de tensão ou corrente, correntes de neutro e promover a devida correção no fator de potência. Sua grande desvantagem ainda é o custo e complexidade, principalmente quando usado isoladamente.

3.5.1 Classificação dos filtros ativos de potência

Dentre os tipos de classificação segundo categorias básicas dos filtros ativos de potência, pode-se as seguintes:

- Quanto à natureza do barramento CC;
- Quanto à configuração;
- Quanto ao sistema de suprimento de energia;
- Quanto ao número de níveis.

3.5.1.1 Classificação quanto à natureza do barramento CC

Existem dois tipos de conversores usados no desenvolvimento de FAP's, as estruturas, com ponte inversora, alimentadas por fonte de corrente (CSI's, Current Source Inverter) e as estruturas, com ponte inversora, alimentadas por fonte de tensão (VSI's, Voltage Source Inverter). Estes tipos de estruturas são analisados e avaliados a seguir.

3.5.1.1.1 Estrutura em ponte inversora alimentada por fonte de corrente (CSI)

Neste caso, o barramento CC do conversor comporta-se como uma fonte de corrente, onde o elemento armazenador de energia é indutivo conforme mostrado na figura 3.7 a seguir.

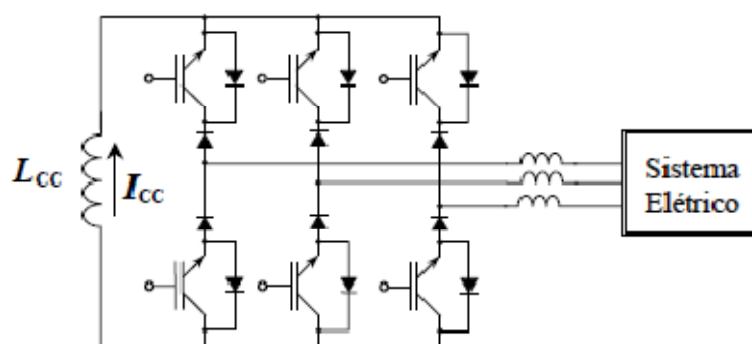


Figura 3.7- Filtro ativo de potência com estrutura CSI.

A utilização desta estrutura torna-se vantajosa para algumas aplicações em sistemas de transmissão e altas potências, principalmente na correção do fator de potência e minimização das perdas em regime permanente.

3.5.1.1.2 Estrutura em ponte inversora alimentada por fonte de tensão (VSI)

Neste caso o barramento CC do conversor comporta-se como uma fonte de tensão, onde o elemento armazenador de energia no barramento CC é capacitivo, como mostrado na figura 3.8.

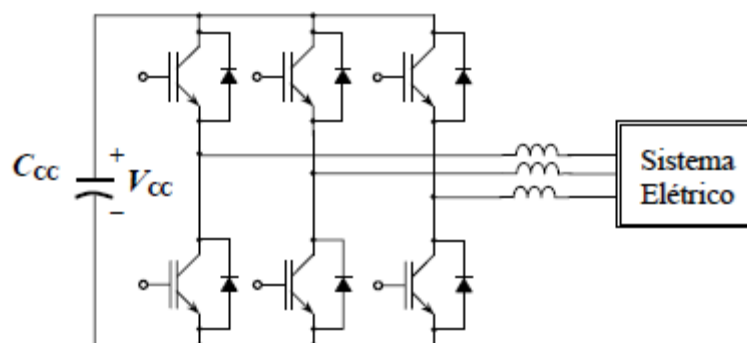


Figura 3.8- Filtro ativo de potência com estrutura VSI.

Esta estrutura tornou-se mais predominante, devido à sua leveza, pequeno volume dos capacitores e custo inferior se comparado com a estrutura CSI para as faixas de pequenas e médias potências.

3.5.1.2 Classificação quanto à configuração

Os filtros ativos podem ser classificados quanto à configuração utilizada em:

- Filtro ativo paralelo (ou shunt);
- Filtro ativo série;
- Associação de filtros ativo série e paralelo.

3.5.1.2.1 Filtro ativo paralelo (ou Shunt)

O filtro ativo paralelo tem como principal característica a conexão do conversor estático em paralelo com o sistema de energia elétrica.

Geralmente os filtros ativos paralelos são conectados no ponto de acoplamento comum (PAC), entre cargas e rede elétrica. Um diagrama esquemático de um filtro ativo paralelo, com estrutura VSI, ligado a um sistema elétrico é mostrado na figura 3.9.

Esta compensação paralela atua como uma fonte de corrente alternada controlada, conforme figura 3.10, sendo usada principalmente em sistemas elétricos que apresentem cargas não lineares conectadas, para compensação de fator de potência, harmônicos de corrente, potência reativa, cargas desequilibradas, e compensação de corrente no neutro.

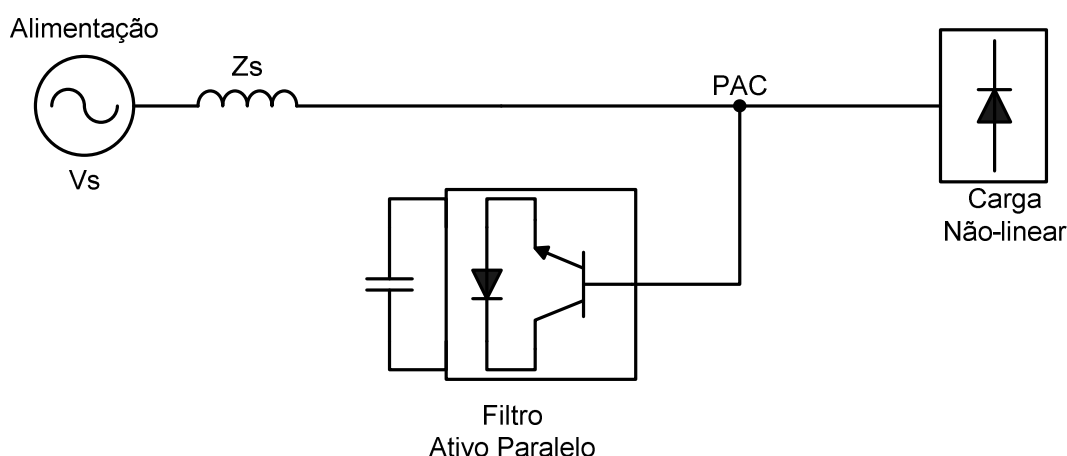


Figura 3.9- Filtro ativo paralelo, com estrutura VSI, conectado ao sistema elétrico.

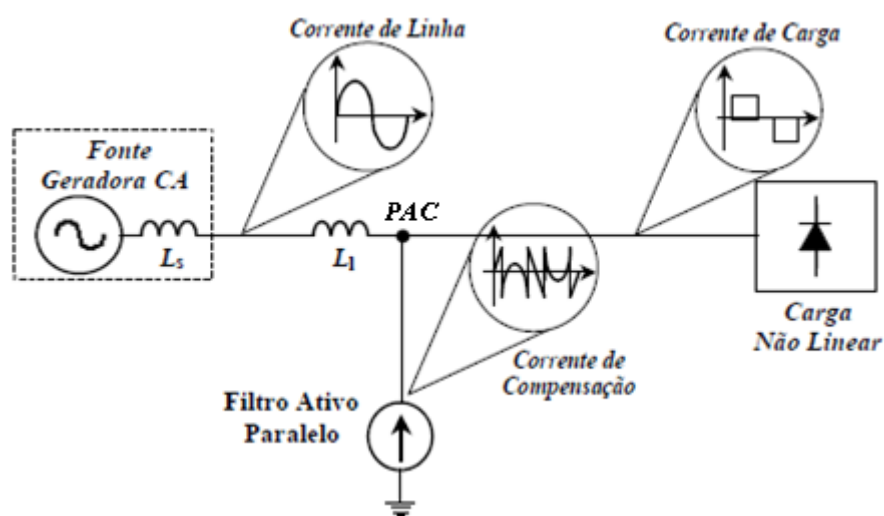


Figura 3.10- Filtro ativo paralelo atuando como fonte de corrente CA controlada.

3.5.1.2.2 Filtro ativo série

O filtro ativo série tem como principal característica a conexão em série com a via principal de energia elétrica. Esta conexão, entre conversor estático e sistema elétrico, é geralmente realizada através do uso de um transformador de acoplamento, conforme diagrama esquemático da figura 3.11.

Geralmente os filtros ativos série não têm uma localização específica, porém muitas vezes são colocados próximos ao PAC, podendo ser instalados tanto pelas concessionárias quanto pelos usuários finais.

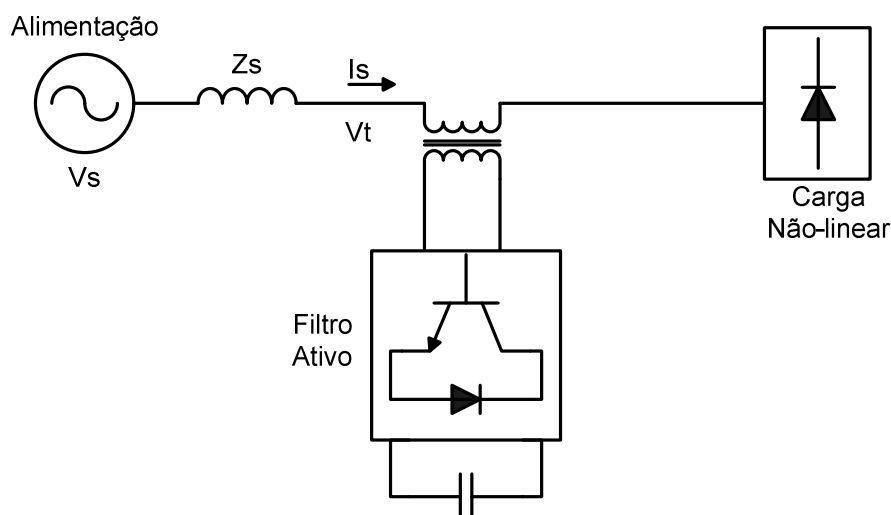


Figura 3.11- Filtro ativo série, com estrutura VSI, conectado ao sistema elétrico.

A compensação série atua como uma fonte de tensão CA controlada, conforme mostrado na figura 3.12.

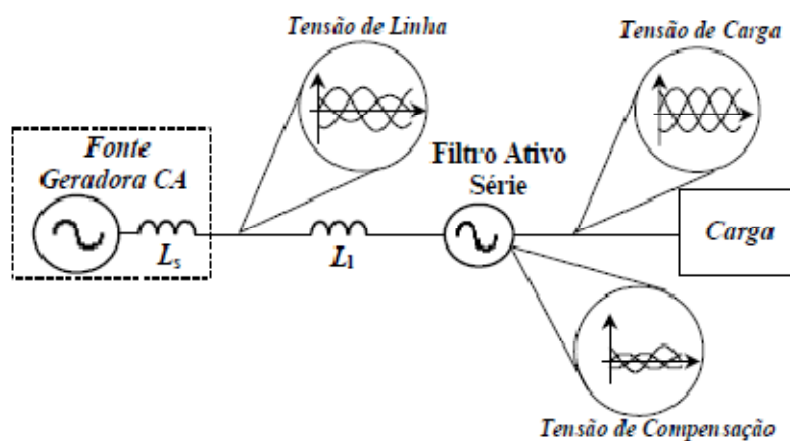


Figura 3.12- Filtro ativo série atuando como fonte de tensão CA controlada.

A compensação baseada em tensão é empregada na regulação e balanceamento de tensão próximo a carga ou na linha (de distribuição ou

transmissão). É utilizada também para atenuar ou eliminar harmônicos, afundamentos e elevações de tensão e diminuir a propagação de harmônicos causados pelo efeito de ressonância entre as impedâncias da fonte e filtros passivos instalados no sistema elétrico.

3.5.1.2.3 Associação de filtros ativos série e paralelo

A associação de filtros ativos séries e paralelos, conforme figura 3.13, apresenta como vantagem a compensação de harmônicos tanto de tensão quanto de corrente.

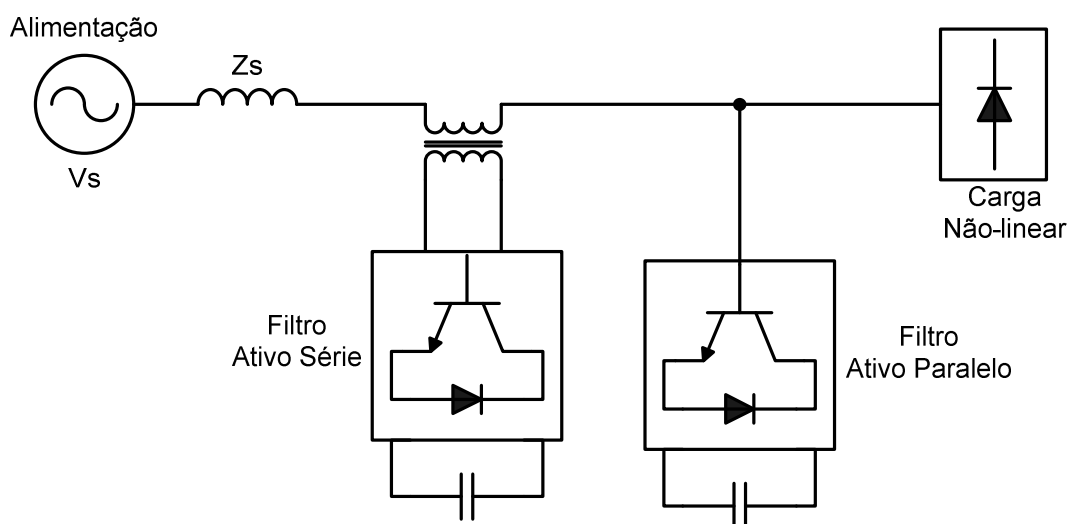


Figura 3.13- Associação de filtro ativo série e ativo paralelo.

A característica desta configuração é compensar desequilíbrios e distorções de tensão através do filtro ativo série, e compensar harmônicos e desequilíbrios de corrente através do filtro ativo paralelo. Portanto, esta configuração compensa simultaneamente a tensão de suprimento e a corrente da

carga, de tal forma que a tensão compensada e a corrente drenada da fonte tornam-se senoidais, equilibradas e em fase, melhorando sensivelmente a qualidade da energia suprida.

3.5.1.3 Classificação quanto ao sistema de suprimento de energia

A classificação dos filtros ativos baseada no sistema de suprimento de energia é definida pelo uso dos dois tipos principais de sistemas elétricos, o sistema monofásico e o sistema trifásico.

3.5.1.3.1 Sistema de suprimento de energia monofásico

O FAP empregado no sistema de suprimento de energia monofásico, se caracteriza pelo uso de dois fios condutores para conexão a rede elétrica e/ou cargas. Este sistema é usado em várias cargas não lineares monofásicas, principalmente de aplicações domésticas (assim como PC's, iluminação artificial), que estão conectadas ao sistemas de suprimento de energia elétrica trifásico.

Os filtros ativos à dois fios podem ser implementados em todas as três configurações de filtros ativos (série, paralelo e híbrido), também em ambas as configurações de conversores, alimentados por fonte de corrente ou tensão. As figuras 3.14 e 3.15 mostram configurações de filtros ativos a dois fios.

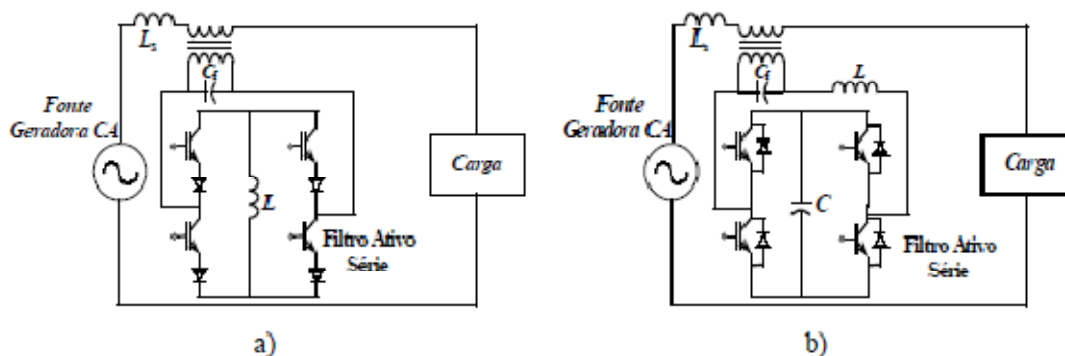


Figura 3.14- Filtro ativo série a dois fios: a) com estrutura CSI, b) com estrutura VSI.

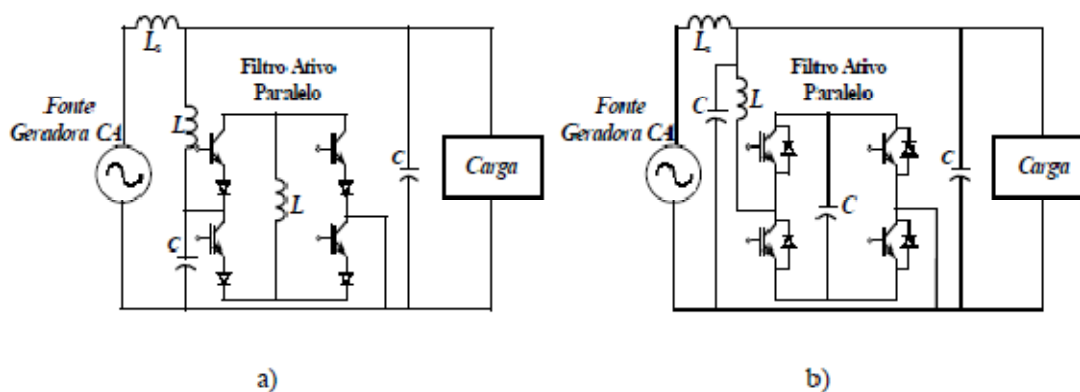


Figura 3.15- Filtro ativo paralelo a dois fios: a) com estrutura CSI, b) com estrutura VSI.

Apesar da possibilidade de implementação de filtros ativos monofásicos com estrutura CSI, a sua competitividade é comprometida pelo elevado número de dispositivos semicondutores e necessidade do uso de um indutor no lado CC do conversor.

3.5.1.3.2 Sistema de suprimento de energia trifásico

A classificação quanto ao sistema de suprimento de energia trifásica se caracteriza pela utilização de sistemas a três fios condutores ou sistemas a quatro fios.

3.5.1.3.3 Sistema de suprimento de energia trifásico

A classificação quanto ao sistema de suprimento de energia trifásico se caracteriza pela utilização de sistemas a três fios condutores ou sistemas a quatro fios.

3.5.1.3.3.1 Sistema a três fios

Este sistema se caracteriza pela utilização do FAP na configuração a três fios condutores. É empregado principalmente em sistemas de transmissão, distribuição e na presença de cargas trifásicas a três fios.

Geralmente, este sistema é usado na compensação de distúrbios presentes em uma rede trifásica a três fios, conforme figura 3.16 na configuração série e figura 3.17 na configuração paralela.

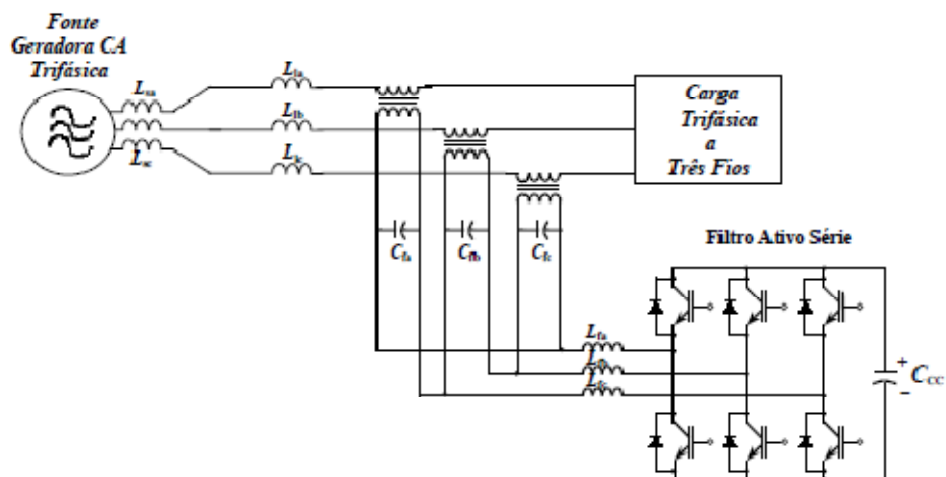


Figura 3.16- Filtro ativo série trifásico a três fios.

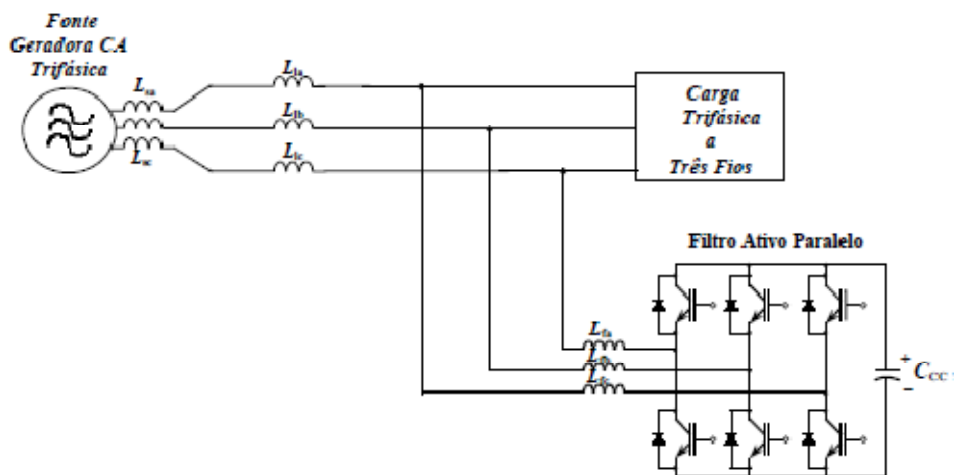


Figura 3.17- Filtro ativo paralelo trifásico a três fios.

3.5.1.3.3.1 Sistema utilizando quatro fios

Este sistema se caracteriza pela utilização do FAP na configuração a três fios condutores e um fio neutro. É empregado principalmente em sistemas de distribuição, na presença de cargas trifásicas a quatro fios e cargas monofásicas.

Geralmente, o FAP é usado para compensação de correntes de neutro, potência reativa e desbalanceamento de corrente. As figuras 3.18 a 3.20 mostram três típicas configurações de filtros ativos paralelos. A primeira é conhecida pelo uso de capacitores em derivação no barramento CC, onde a corrente de neutro flui através do barramento CC constituído de capacitores, os quais possuem uma alta capacitância. Neste caso as componentes harmônicas de 3ª ordem e suas múltiplas fluem através dos capacitores.

Esta topologia tem como vantagem a utilização de apenas 6 dispositivos semicondutores e como desvantagem a necessidade de altas capacitâncias no barramento CC para reduzir a ondulação devido à corrente de neutro.

A segunda mostra outra configuração conhecida como inversor a quatro braços, na qual o quarto braço do conversor é usada para fornecer um caminho para as correntes de neutro do filtro ativo. Apresenta um número maior de dispositivos semicondutores (oito), em relação à configuração anterior, porém não apresenta os esforços de corrente nos capacitores do barramento CC da topologia anterior.

A configuração utilizando três pontes monofásicas, mostradas na figura 3.20, permite a regulação independente de corrente em cada fase, porém apresenta como desvantagem o grande número de dispositivos semicondutores (doze).

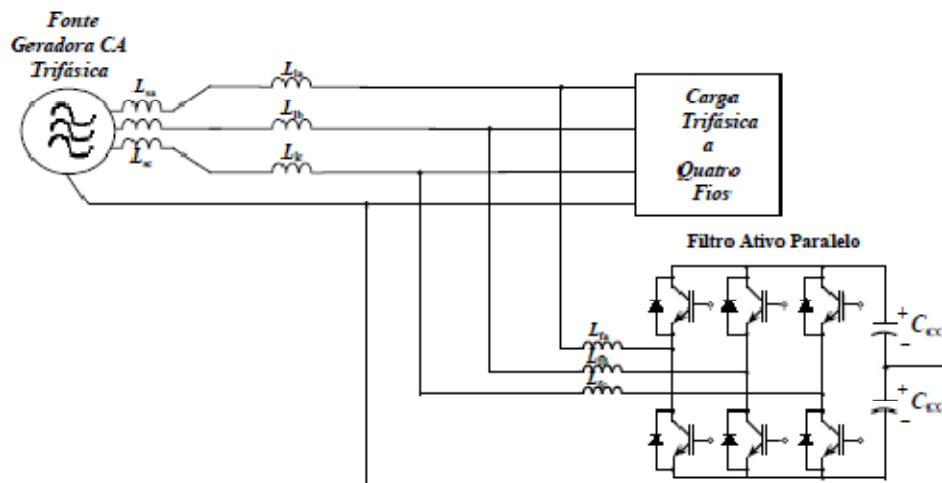


Figura 3.18- Filtro ativo paralelo a quatro fios com derivação capacitiva no barramento CC.

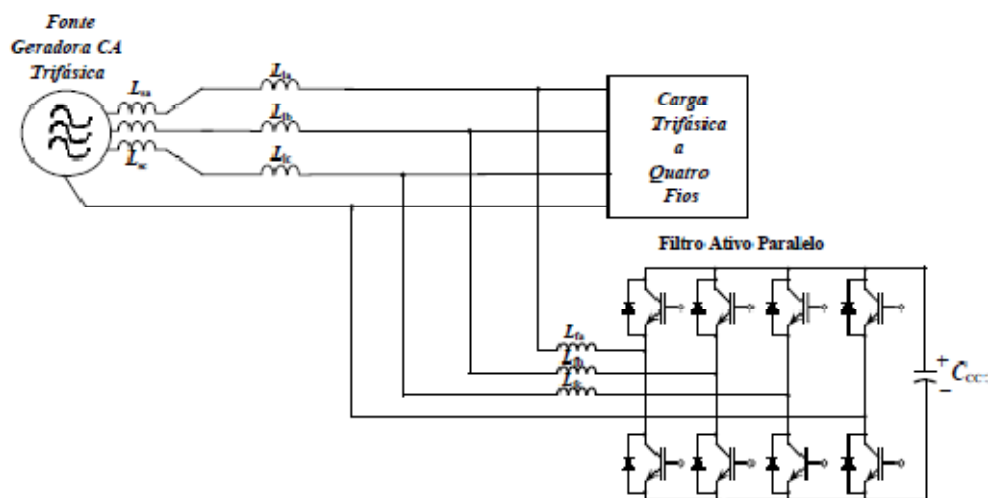


Figura 3.19- Filtro ativo paralelo a quatro fios com inversor com quatro braços.

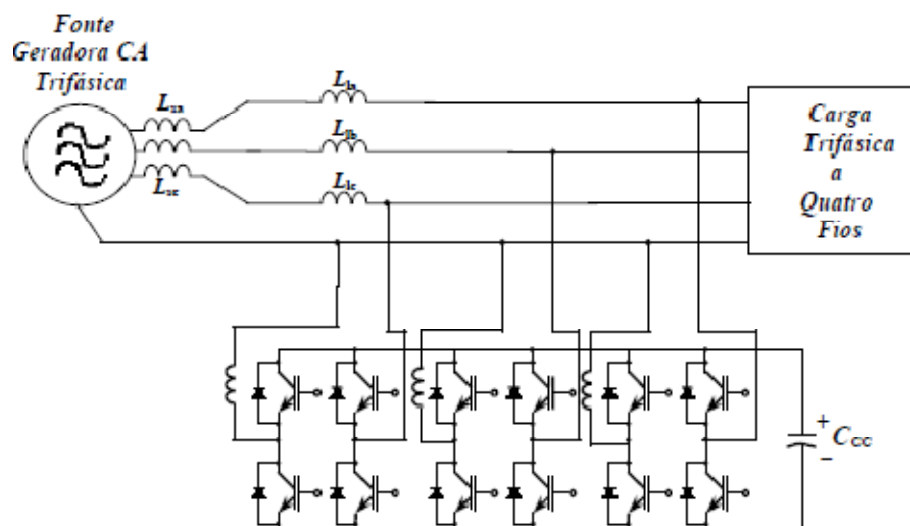


Figura 3.20- Filtro ativo paralelo a quatro fios com três pontes monofásicas.

3.5.1.4 Classificação quanto ao número de níveis

Essa classificação dos FAP's é baseada no número de níveis do conversor podendo ser: (i) dois níveis, conforme figuras 3.18 e 3.20 ou (ii) três ou mais níveis, conforme figura 3.21.

A utilização de configurações com apenas dois nível apresenta uma limitação importante, quando esta não utiliza transformador para o acoplamento com a rede, esta limitação é com respeito aos semicondutores de potência utilizados, visto que atualmente estes podem suportar tensões inferiores a 5 kV.

Para contornar tal limitação sem o uso de transformadores de isolação, o conversor com vários níveis torna-se uma solução possível. A utilização desta em sistemas de média tensão pode ser implementado com filtros ativos paralelos, série e topologias híbridas, com uso de inversores modulares em configuração multinível. Um exemplo de um conversor, apresentando três níveis e conectada em paralelo com o sistema é mostrada na figura 3.21.

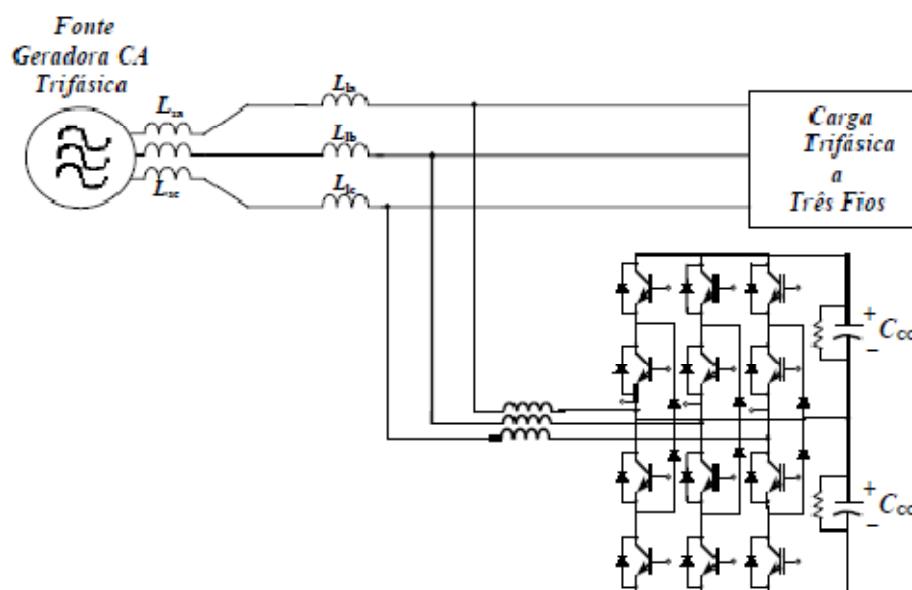


Figura 3.21- Filtro ativo paralelo com conversor três níveis.

3.5.2 Seleção dos filtros ativos de potência para aplicações específicas

A seleção dos FAP's para uma aplicação particular é uma importante tarefa para as concessionárias de energia, usuários finais e engenheiros. Existe uma ampla variedade de configurações, como filtros ativos monofásicos, trifásicos a três fios e a quatro fios. Todas estas com possibilidade de realizar tanto compensação baseadas em tensão como em corrente. Entretanto existem algumas configurações que satisfazem necessidades particulares de cada usuário.

As tabelas 3.2 a 3.5 apresentam um resumo das classificações dos FAP's mostradas anteriormente e a tabela 3.6 apresenta uma seleção dos FAP's para

determinadas aplicações específicas baseadas na classificação quanto à topologia dos FAP's.

Tabela 3-2: Quanto ao tipo de conversor

Estrutura	Comportamento
CSI	Como fonte de corrente
VSI	Como fonte de tensão

Tabela 3-3: Quanto a configuração

Configuração	Utilização em compensações
Paralelo	Corrente, fator de potência
Série	Desequilíbrios de tens

Tabela 3-4: Quanto ao sistema de suprimento de energia

Número de fios	Utilização em cargas
Dois (fase-neutro)	Monofásicas
Três (3 fases)	Trifásicas
Quatro (3 fases – 1 neutro)	Trifásicas e monofásicas (ligadas ao sistema trifásico a quatro fios)

Tabela 3-5: Quanto ao número de níveis

Topologia	Aplicação
2 Nível	Baixas potências
3 Nível	Médias potências
Multiníveis	Altas potências, altas tensões

Tabela 3-6: Seleção dos filtros ativos para aplicações específicas

Compensação para aplicação específica	Filtros ativos			
	Ativo série	Ativo paralelo	Híbrido ativo paralelo e passivo paralelo	Ativo série e ativo paralelo
A. Correntes harmônicas	-	2º	1º	3º
B. Potência reativa	-	1º	2º	3º
C. Balanceamento de carga	-	1º	-	-
D. Corrente de neutro	-	1º	2º	-
E. Harmônica de tensão	1º	-	2º	3º
F. Regulação de tensão	1º	3º	2º	3º
G. Equilíbrio de tensão	1º	-	2º	3º
H. Afundamento de tensão	1º	3º	2º	3º
I. Itens (A+B)	-	1º	2º	3
J. Itens (A+B+C)	-	1º	-	2º
L. Itens (A+B+C+D)	-	1º	-	-
M. Itens (E+F)	1º	-	-	2º
N. Itens(E+F+H)	1º	-	-	2º
O. Itens (A+E)	-	-	1º	-
P. Itens (A+B+E+F)	-	-	2º	1º
Q. Itens (F+G)	1º	-	2º	-
R. Itens (B+C)	-	1º	-	-
S. Itens (B+C+D)	-	1º	-	-
T. Itens (A+B+G)	-	1º	2º	-
U. Itens (A+C)	-	1º	-	-

Observação: Fonte referência [36]

Legenda:

1º - FAP mais utilizado

2º - Segundo FAP mais utilizado

3º - Terceiro FAP mais utilizado

3.6 FILTROS HÍBRIDOS

A tecnologia dos filtros de potência atingiu um elevado patamar de desenvolvimento, pois permite realizar compensação de corrente em diversos tipos de cargas não-lineares, e compensação de tensão. Os filtros de potência também são identificados de acordo com a natureza da carga não-linear a ser compensada, sendo estas divididas em três tipos: fonte de tensão (retificador com carga capacitiva), fonte de corrente (retificador com carga indutiva ou inversor do tipo fonte de corrente) e uma combinação dos dois tipos de carga. Várias topologias foram propostas para a melhoria da qualidade de energia elétrica, dentre as quais se destacam os filtros passivos, ativos (inversor do tipo fonte de corrente ou tensão), híbrido paralelo, série ou série-paralelo, aplicados em sistemas monofásicos, trifásicos a três fios e a quatro fios.

Os filtros híbridos são considerados uma boa opção para propiciar uma melhora na qualidade da energia elétrica, pois possuem uma boa relação custo benefício e são apontados como uma boa solução para a compensação de cargas não-lineares, provendo desta forma um sistema elétrico livre de distúrbios harmônicos. Filtros híbridos são implementados através da associação de filtros passivos e ativos, podendo esta associação ser em série (filtro híbrido série), paralelo (filtro híbrido paralelo) ou série-paralelo (filtro híbrido série-paralelo) [40]. Com isto pode-se obter melhor desempenho, quando comparado a um filtro passivo ou ativo puro, respectivamente.

Uma das principais razões para o avanço dos filtros híbridos deve-se ao avanço da tecnologia dos elementos que compõe um filtro ativo, como as chaves semicondutoras de estado sólido com elevada frequência de chaveamento, como o MOSFET e o IGBT. O desenvolvimento de sensores de baixo custo propiciou a melhora da resposta e custo dos filtros híbridos. Sensores de efeito hall e

amplificadores isolados têm tornado os filtros híbridos ainda mais acessíveis [41].

Outro fator importante para esta revolução dos filtros híbridos deve-se à evolução da tecnologia na área da microeletrônica. O desenvolvimento de processadores de sinais, microcontroladores com baixo custo, alta precisão e rapidez, tornaram possível a implementação de algoritmos de controle complexos para o controle em tempo real, com preços acessíveis.

3.6.1 Filtro híbrido série

Um filtro híbrido série é composto pela conexão série de um filtro ativo e passivo, conectado em paralelo ao sistema elétrico e à carga não-linear. Na figura 3.22 é mostrada a topologia em análise.

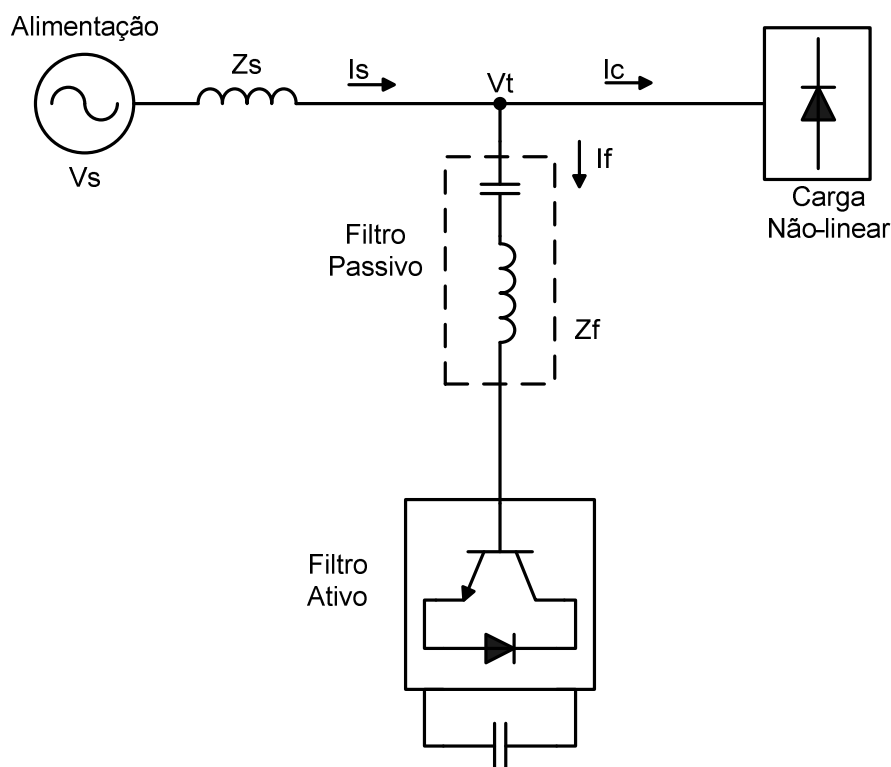


Figura 3.22- Topologia de um filtro híbrido série.

Com a conexão do filtro ativo é possível melhorar significativamente as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva existente, eliminando as desvantagens da aplicação isolada do filtro ativo e passivo. Nesta configuração, o filtro passivo atua absorvendo as componentes não-lineares da carga e, em contrapartida, o filtro ativo atua como um isolador harmônico entre a rede elétrica e o filtro passivo, permitindo assim eliminar a ressonância harmônica no sistema elétrico. Como a maior parte da tensão está aplicada sobre o filtro passivo, e o filtro ativo se comporta como um curto-circuito para a componente fundamental consegue-se reduzir a sua potência nominal de forma significativa quando comparado ao filtro ativo puro. Como consequência, esta topologia torna-se atrativa, com baixo custo em aplicações de elevada potência na indústria.

Com o avanço da Eletrônica de Potência, principalmente no que concerne às chaves semicondutoras com elevada capacidade de potência e chaveamento, como IGBT e IGCT, não há necessidade de um transformador para fazer o acoplamento entre o filtro ativo e o passivo, pois os inversores de média tensão existentes no mercado suportam os níveis de tensão e corrente exigidos. Como consequência, muitos sistemas elétricos industriais que utilizam um sistema de filtragem passiva estariam aptos a compor esta topologia híbrida.

As principais funções de um filtro híbrido série são:

- Isolação harmônica;
- Compensação harmônica;
- Regulação de tensão;
- Compensador de desequilíbrios;
- Controle de potência reativa fundamental;

Um filtro híbrido série tem como desvantagem o seu baixo desempenho na compensação harmônica em elevadas frequências.

3.6.2 *Filtro híbrido paralelo*

Na topologia híbrida paralela, um filtro ativo é conectado em paralelo ao sistema de filtragem passiva, à carga não-linear e ao sistema elétrico. A topologia é apresentada na figura 3.23.

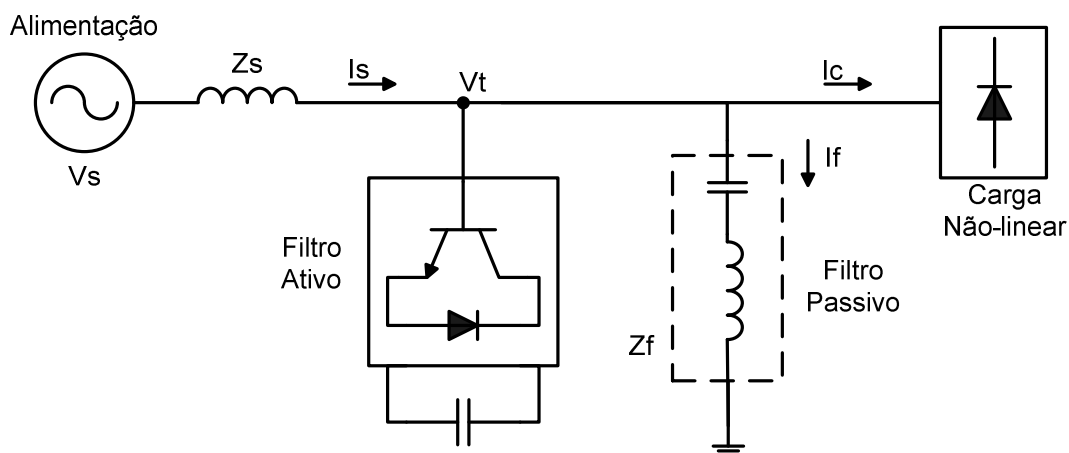


Figura 3.23- Filtro híbrido paralelo.

Nesta topologia o filtro passivo cria um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas da carga, além de ser um compensador de reativos na frequência fundamental. Já o filtro ativo opera injetando correntes em fase oposta a da carga não-linear, cancelando as harmônicas de forma parcial ou em sua totalidade. Um filtro híbrido paralelo, além de realizar a compensação harmônica e de reativos fundamentais, pode amortecer a ressonância harmônica em um sistema elétrico.

Dentre as principais funções de um filtro híbrido paralelo podem ser destacadas:

- Compensação harmônica de corrente;
- Controle de reativos fundamentais;
- Compensador de desequilíbrio de corrente;
- Redução de flicker na tensão;

Dependendo do nível de tensão no sistema elétrico ao qual um filtro híbrido paralelo é conectado, pode haver a necessidade do uso de um

transformador para fazer a conexão do filtro ativo. Desta forma o transformador reduz a tensão para um nível que possa ser utilizado um inversor compatível, aumentando assim os custos e complexidade do projeto.

3.6.3 Filtro híbrido série-paralelo

Outro tipo de filtro híbrido conhecido são os formados pela combinação do filtro ativo série e passivo paralelo, conforme figura 3.24.

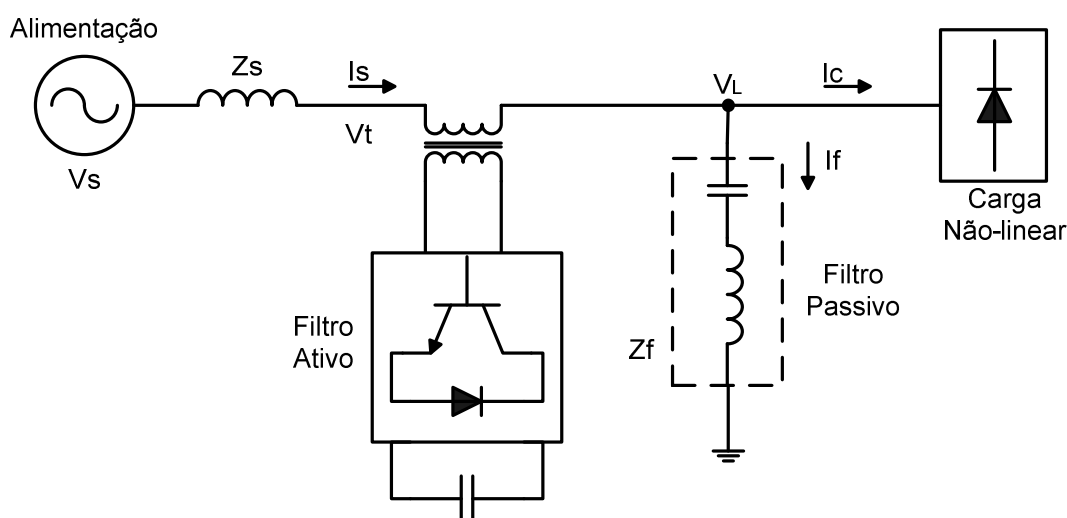


Figura 3.24- Filtro híbrido série-paralelo.

Os filtros híbridos série-paralelo são utilizados para compensação em sistemas industriais de média e alta potência, porque os dispositivos semicondutores usados em parte dos filtros ativos série podem ser de tamanho e custo reduzidos (aproximadamente de 5% a 20% do tamanho da carga), onde a maior parte do filtro híbrido é constituído pelo filtro passivo paralelo (filtros L-

C) usado para eliminar harmônicos de baixa ordem. Estes filtros híbridos possuem a capacidade de reduzir harmônicos de tensão e corrente.

Estes filtros podem ser empregados para a regulação de tensão e compensação de fator de potência e atenuação de harmônicos de corrente. O filtro ativo é usado para eliminar problemas como ressonância e influência da impedância de alimentação, e melhorar a característica de compensação do filtro passivo.

Assim como o filtro híbrido paralelo, este tipo de filtro tem a vantagem de reduzir custo devido à redução do conversor do filtro ativo. Porém, problemas no filtro ativo série podem afetar a regulação de tensão na carga.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo foi dedicado aos estudos dos filtros harmônicos em foco neste trabalho. Foi discutido características, funções e classificações destes equipamentos, obtendo consequentemente noções de aplicação de cada equipamento de acordo com a necessidade de cada caso.

Inicialmente, foram apresentados os tipos de capacitores em baixa tensão existentes no mercado atual, PPM e NÃO-PPM. Através da comparação entre as duas tecnologias, observou-se que os capacitores NÃO-PPM são seguramente mais robustos que os capacitores construídos com PPM, apresentando maior vida útil comparativa.

Em seguida, aspectos físicos dos filtros passivos foram devidamente abordados, tais como o fenômeno da dessintonização e as características de ressonância ou de sintonia. A dessintonização teve suas origens explicadas e analisadas, o que culminou na obtenção de expressões de uso prático no cálculo do desvio equivalente de frequência. Dando seguimento a esta análise, foram

abordados e equacionados os efeitos da dessintonização sobre a impedância dos filtros sintonizados. Ainda para o caso dos filtros sintonizados, demonstrou-se a estreita ligação existente entre fator de qualidade e a seletividade dos circuitos ressonantes.

Além disso, foi observado que os filtros passivos estudados são capacitivos à frequência fundamental. Para a frequência harmônica de sintonia, os filtros sintonizados apresentam, em geral, baixa impedância resistiva. Para as demais frequências, os filtros sintonizados apresentam impedância bastante elevada.

Foi através deste último conceito que surgiram no mercado os filtros dessintonizados. Estes são sintonizados em uma frequência não característica e possuem alta impedância para frequências acima da de sintonia fazendo com que as componente harmônicas não adentrem o equipamento, evitando danos aos seus componentes. Com o filtro dessintonizado consegue-se corrigir o fator de potência e evita ressonância entre o circuito LC formado pelo banco de capacitores e o sistema. Sua aplicação verifica-se em sistemas onde se deseja apenas corrigir o fator de potência, evitando possíveis ressonâncias.

Os filtros ativos apresentam uma melhor resposta dinâmica se comparado aos filtros passivos e podem ser dimensionados para eliminar apenas determinadas ordens harmônicas principais ou reduzir igualmente e percentualmente cada componente harmônica presente. São capazes de oferecer um melhor desempenho, na compensação de determinados distúrbios periódicos, porém, ainda possuem como desvantagem o custo e complexidade. De acordo com suas características os filtros ativos são aplicáveis em sistemas onde se tem como objetivo principal a mitigação de harmônicos e não a compensação reativa.

Através da associação entre os filtros passivos e os ativos têm-se os chamados filtros híbridos. Estes filtros podem ser empregados para a regulação

de tensão, compensação de fator de potência e atenuação de harmônicos de corrente.

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÃO DIGITAL E COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE FILTROS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O capítulo anterior discutiu as principais funções, vantagens, desvantagens e os métodos de projeto de banco de capacitores, filtro harmônico passivo dessintonizado, filtro harmônico passivo sintonizado, filtro harmônico ativo e filtro harmônico híbrido. Neste capítulo, o desempenho de cada um destes equipamentos será simulado e analisado através de estudo de um caso real. Neste estudo, o foco será o desempenho técnico de cada um dos equipamentos mencionados, sendo que serão comparados os resultados de medição e simulação obtidos e seus respectivos custos de aplicação. Neste sentido, os seguintes aspectos técnicos serão avaliados: tensão eficaz, corrente eficaz, distorção harmônica total de tensão (DTT), distorção harmônica total de corrente (DTI), curvas de impedância x frequência, potências ativa, reativa, aparente, de distorção harmônica e fator de potência.

Para a execução do trabalho utilizou-se do Programa Power Quality (PQF). O programa fundamenta-se em técnicas do domínio da frequência, para a solução do fluxo harmônico, fluxo de potência e a análise das ampliações e

correção de fator de potência em sistemas elétricos enfatizando que o PQF utiliza uma análise monofásica.

Sua metodologia de simulação consiste na solução linear da matriz admitância harmônica, onde, para cada frequência, o programa realiza os cálculos do fluxo harmônico, fornecendo como resultados as distorções harmônica e corrente nas diversas barras e linhas do sistema em estudo.

O programa incorpora em sua estrutura diversos componentes que perfazem um sistema elétrico tais como: transformadores, banco de capacitores, linhas de transmissão, motores de indução, cargas lineares, filtros harmônicos, etc.

Quanto às cargas não lineares, estas são modeladas como fontes de correntes harmônicas, cujos dados (ordem harmônica, amplitude e ângulo de fase) podem ser oriundos de medições de campo, como também a partir de soluções analíticas.

4.2 ESTUDO DE CASO REAL

Neste caso, será apresentado o estudo realizado em uma empresa de telefonia. O objetivo desejado consistia na correção do fator de potência da instalação para valores superiores a 0,92 e a redução dos níveis de distorção harmônica para valores recomendados pela norma (<5%, conforme IEEE Standard 519). Em um primeiro momento, observar-se-á as medições realizadas na empresa antes da inserção de qualquer equipamento para correção de fator de potência ou mitigador de harmônicos. A seguir, utilizando os próprios resultados obtidos na medição, foram realizadas simulações computacionais da condição operativa medida visando validar a modelagem do sistema inicial da empresa (caso base).

Após esta validação, foram realizadas cinco outras simulações a fim de comparar as opções de equipamentos que atendam as necessidades desta empresa, sendo elas:

- Caso 1 - Instalação de banco de capacitores puro;
- Caso 2 - Instalação de filtro harmônico passivo dessintonizado;
- Caso 3 - Instalação de filtros harmônicos passivos sintonizados;
- Caso 4 - Instalação de filtro harmônico ativo;
- Caso 5 - Instalação de filtro harmônico híbrido.

4.2.1 Dados e informações técnicas utilizadas no estudo

A empresa é alimentada pela concessionária local em uma tensão de 13200V e frequência de 60Hz. Logo na entrada possui um transformador redutor de tensão, no secundário do qual todas as cargas da empresa são alimentadas. Dentre estas cargas pode-se destacar a forte presença de computadores. A figura 4.1 apresenta o diagrama unifilar da empresa em estudo.

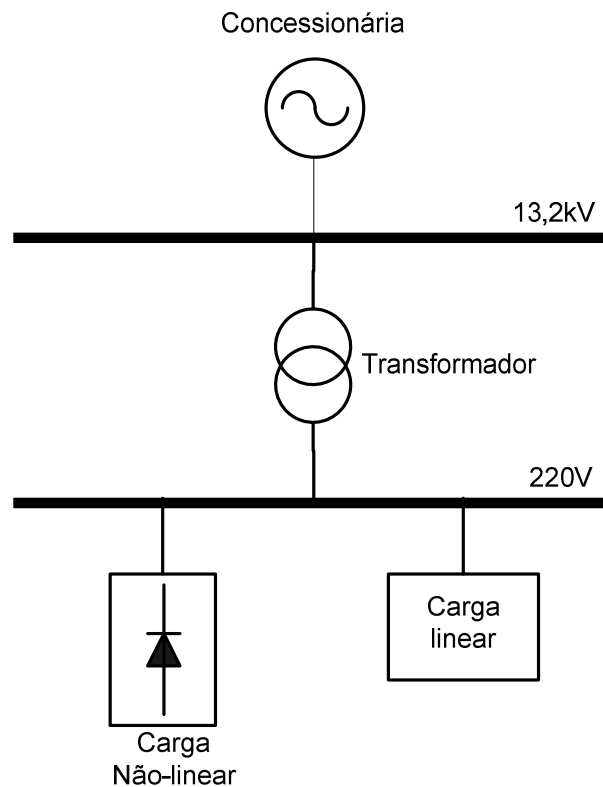


Figura 4.1- Diagrama unifilar da empresa.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os dados técnicos do transformador e da concessionária:

Tabela 4-1: Dados técnicos do transformador

Potência nominal (kVA)	Tipo de conexão	Relação de transformação	Reatância (%)	Resistência (%)
500	Δ - Y	13,2kV / 220V	5,45	1,0

Tabela 4-2: Parâmetros da concessionária de energia

DESCRIÇÃO	VALOR
Potência de curto-circuito	94,53MVA
Tensão nominal	13,2kV
Frequência fundamental	60Hz

4.2.2 *Resultados das medições realizadas*

As medições foram realizadas no secundário do transformador, com o intuito de obter dados em campo, sendo que com estas informações será possível especificar o conteúdo harmônico injetado na barra e obter um modelo de simulação mais próximo da realidade.

Os dados da medição foram aferidos com medidor da marca CIRCUITOR, modelo AR-5 durante três dias com intervalos de integração de 120 segundos. Com a utilização de um programa estatístico de tratamento de dados de medição (Méd) foi possível apresentar estes dados na forma de gráficos e tabelas conforme mostrados a seguir.

Assim na figura 4.2, é apresentado a variação da potência aparente total ao longo do período de medição. Nota-se que esta sofre uma variação entre 207 e 254 kVA, com valores maiores no período comercial dos dias 19(sexta) e 20(sábado), já no mesmo período do dia 21 não foi obtido o mesmo nível de potência, pois neste dia a empresa não tem expediente para funcionários.

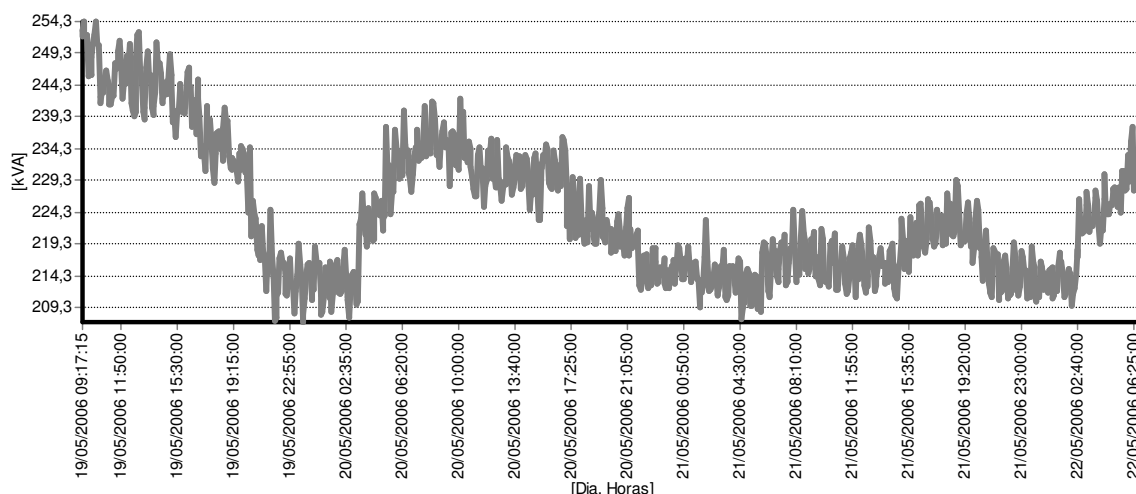


Figura 4.2- Comportamento da potência aparente total.

A fim de quantificar os dados do gráfico anterior e fornecer outras informações importantes, na tabela 4.3 são apresentados os valores mínimos, médios, máximos e probabilidade de 95% (P95) da potência ativa, reativa, de distorção e aparente no ponto de medição. Verifica-se que o carregamento máximo do transformador foi de aproximadamente 50%, com relação à capacidade nominal que é de 500 [kVA]. Percebe-se também pelo valor da potência de distorção, que esta empresa possui um alto conteúdo harmônico.

Tabela 4-3: Valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S

ESTATÍSTICA DE POTÊNCIA TOTAL TRIFÁSICA				
	Mín	Méd	Máx	P95
P(kW)	157,98	174,62	205,79	198,02
Q(kVAr)	90,17	99,70	110,98	106,31
D(kVAr)	94,10	98,89	104,88	102,59
S(kVA)	204,83	224,08	256,25	247,33

Adicionalmente, na figura 4.3 é possível verificar o perfil do fator de potência trifásico total durante todo o período de medição, onde observa-se que este varia entre 0,75 e 0,81, verificando-se necessidade de compensação reativa para evitar a tarifação por excesso de reativo. Observa-se também que o fator de potência mais elevado foi obtido nos períodos de maior carregamento, de onde se conclui que as cargas acrescidas nestes períodos (cargas temporárias) possuem fator de potência maior do que as cargas presentes em todo o período de medição (cargas fixas).

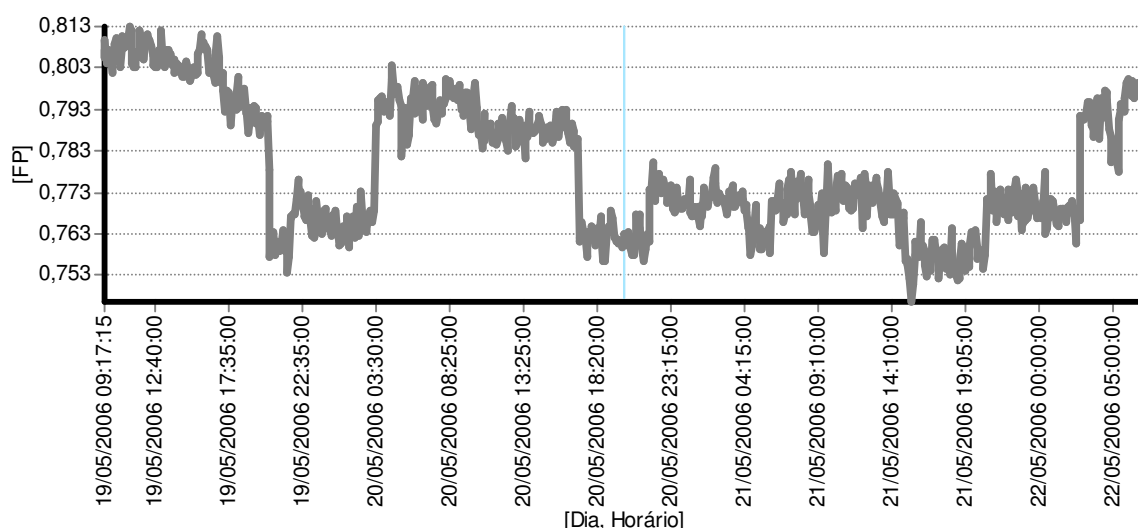


Figura 4.3- Comportamento do fator de potência total.

Já na figura 4.4, verifica-se o perfil do fator de deslocamento. A variação deste está entre 0,83 e 0,88, ou seja, valores maiores se comparados ao fator de potência total. Para justificar este fato pode-se recorrer a uma avaliação das expressões 2.14 e 2.16 mostradas no capítulo 2. A partir destas percebe-se que, a potência aparente é o somatório do produto dos quadrados das correntes e tensões e a potência ativa depende do produto das correntes, tensões e do

cosse no do ângulo entre elas, sendo que o cosse no deste ângulo pode às vezes ter sinal negativo resultando que a potência ativa reduz ao invés de aumentar. Sendo assim, as componentes harmônicas sempre fazem com que o fator de potência total fique abaixo do fator de potência fundamental, pois mesmo que todas contribuam de forma positiva para a potência ativa, a potência aparente sofre um aumento ainda maior, e consequentemente a relação entre as duas potências (fator de potência) se torna menor.

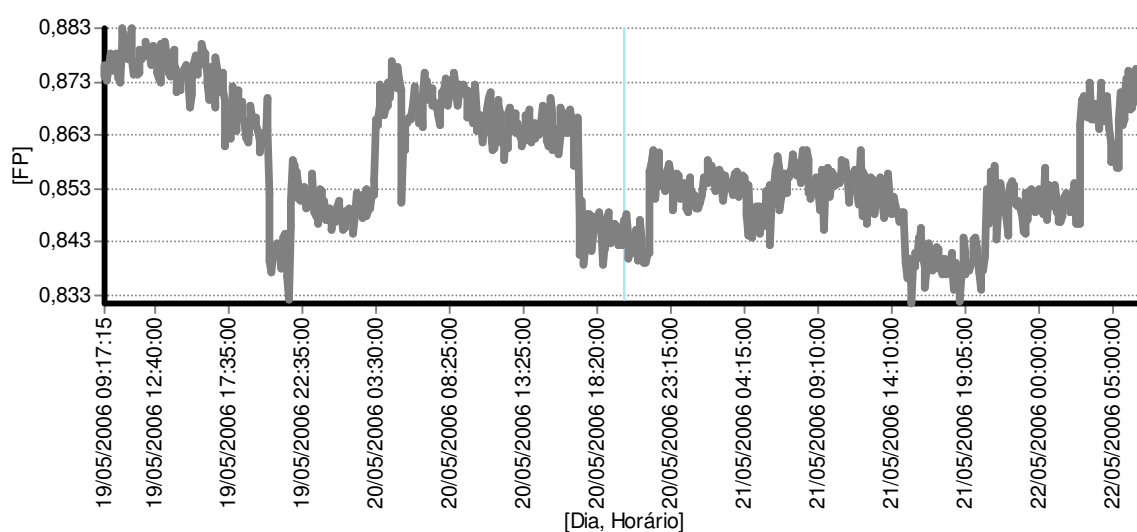


Figura 4.4- Comportamento do fator de deslocamento.

Fica claro, através das figuras anteriores, a importância de se levar em conta os efeitos das distorções harmônicas principalmente no cálculo do fator de potência. Desta forma, evitar-se-á que um baixo fator de potência seja mascarado por um fator de deslocamento alto.

Com os valores instantâneos de potência ativa e do fator de potência é possível calcular os respectivos valores instantâneos de potência reativa a ser inserida para correção do fator de potência para o valor desejado. A tabela 4.4

apresenta os valores mínimos, médios, máximos e de probabilidade P95 destes valores instantâneos para se elevar o fator de potência para 0,92, 0,95, 0,98 e 1,00.

Tabela 4-4: Potências reativas para correção do fator de potência em kVAr

Estatística da necessidade de reativos para correção do fator de potência				
FP	Mín	Méd	Máx	P95
0,92	20,73	30,31	42,16	37,74
0,95	39,70	47,52	59,23	54,42
0,98	62,16	69,73	81,27	75,99
1,00	96,27	105,63	116,88	112,36

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram os espectros harmônicos médios, de probabilidade P95 e máximos da tensão em relação à fundamental, respectivamente, obtidos nas medições realizadas. De acordo com estas figuras, os limites de distorção individual de tensão foram violados nas ordens de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a. A DTT também está acima dos limites, de acordo com a norma do IEEE Std. 519 que é de 5% de distorção.

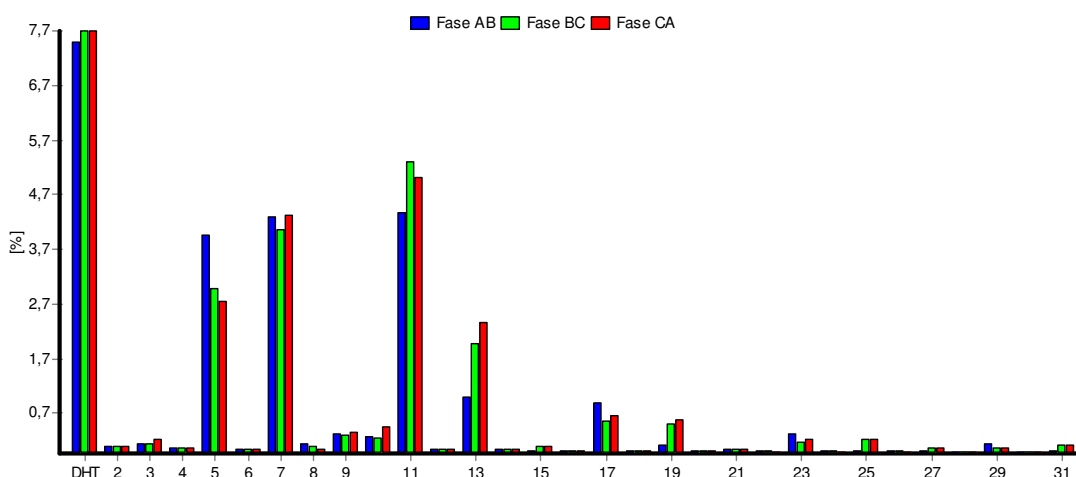


Figura 4.5- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.

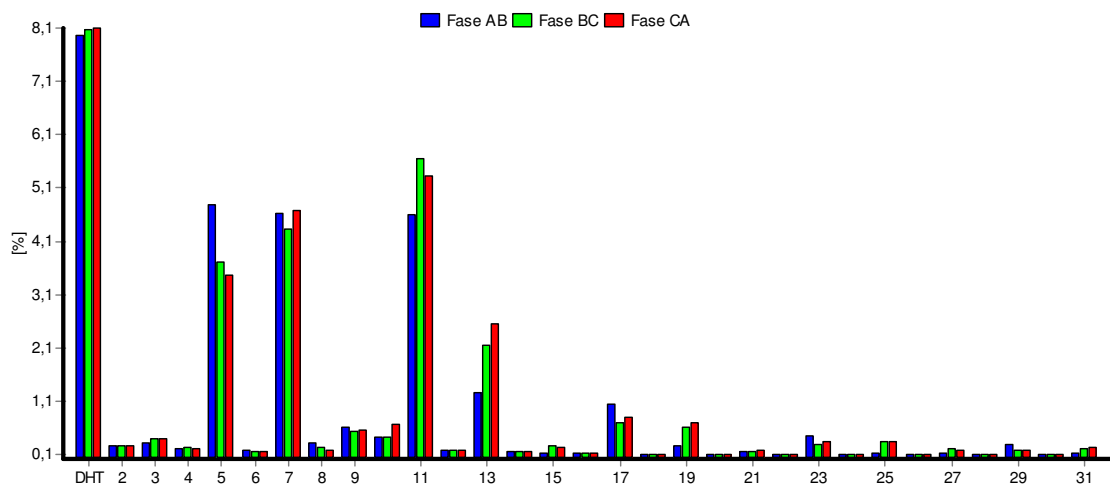


Figura 4.6- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade P95 percentuais.

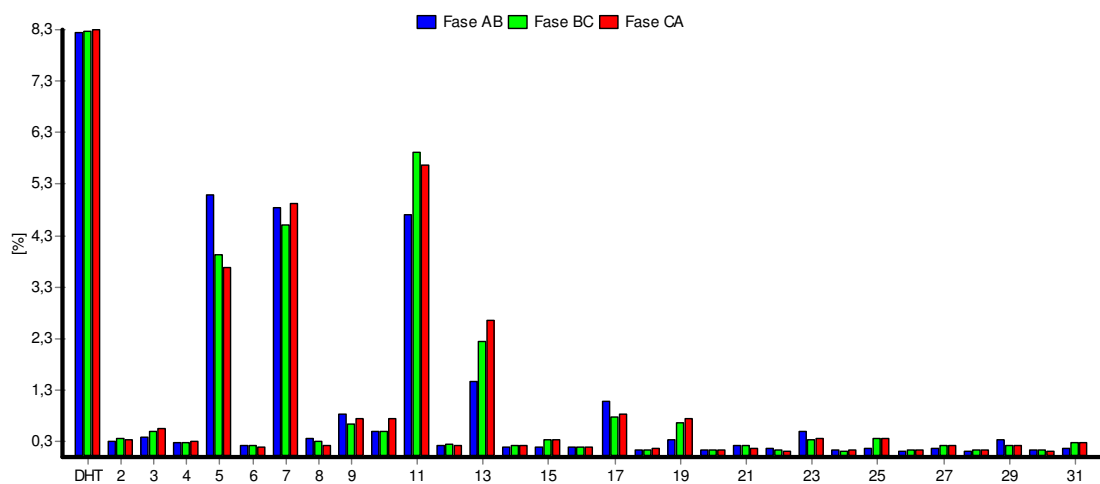


Figura 4.7- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.

As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram os espectros harmônicos médios, de probabilidade P95 e máximos da corrente, respectivamente. De acordo com

estas figuras, os limites de distorção individual de corrente nas ordens de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a e o DTI também ficaram todos bem acima dos limites, conforme a norma IEEE Std 519.

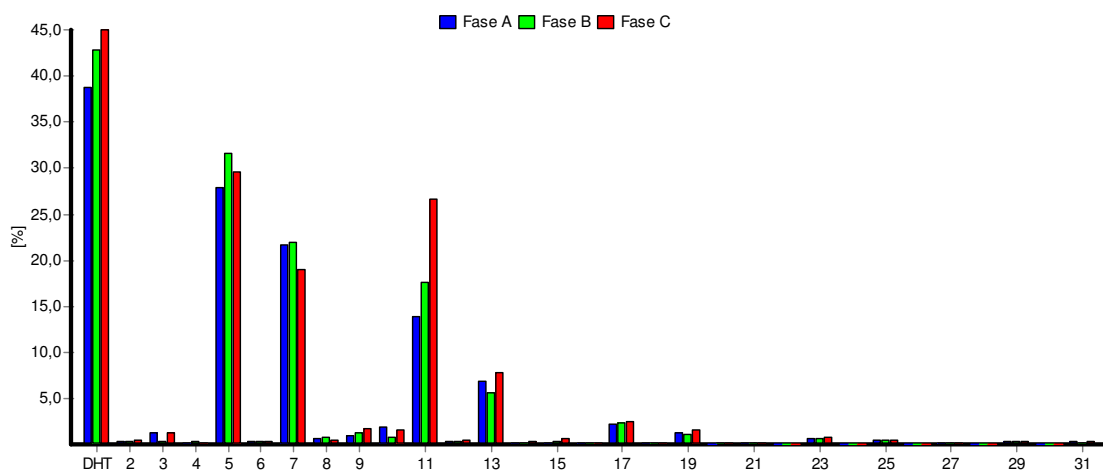


Figura 4.8- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.

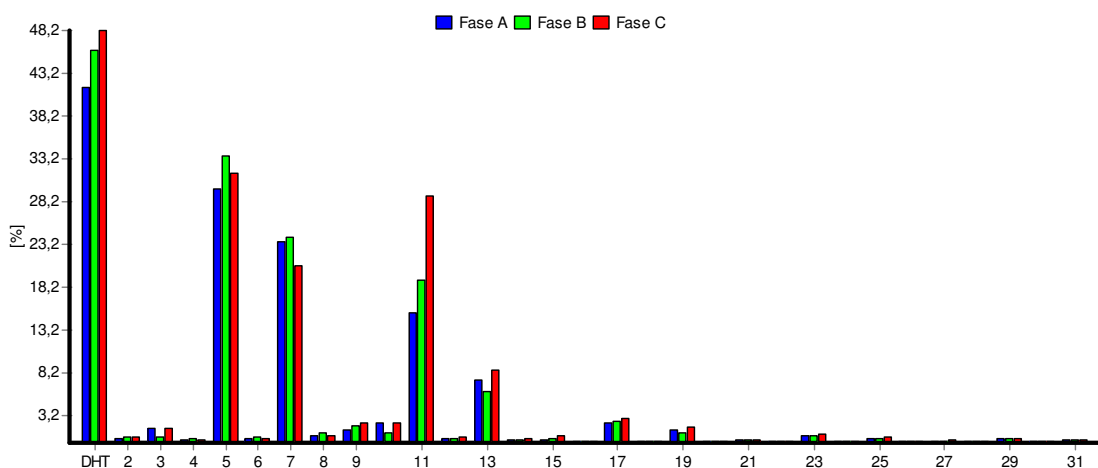


Figura 4.9- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade p95 percentuais.

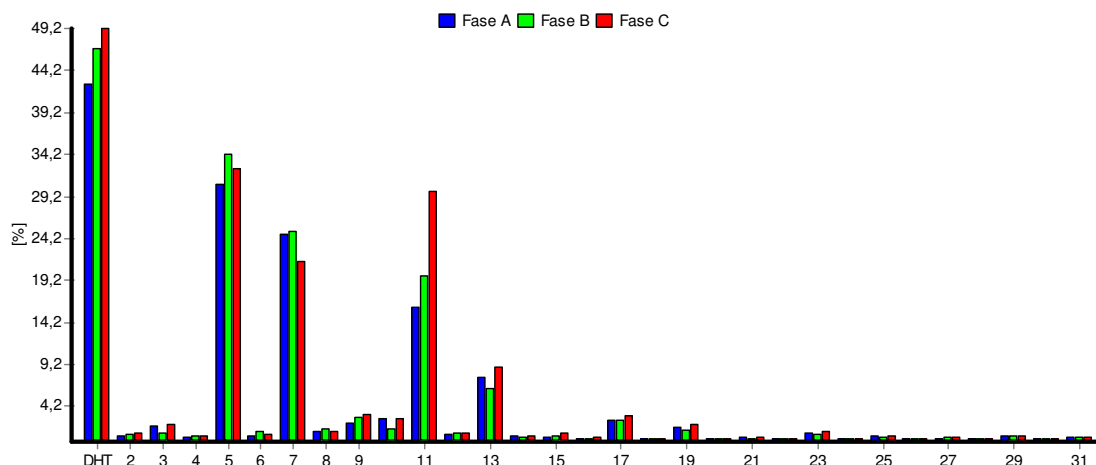


Figura 4.10- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.

A título de ilustração, as figuras 4.11 e 4.12 apresentam as formas de onda da tensão e corrente, respectivamente, no instante de maior distorção harmônica registrada no período de medição. Nota-se que a forma de onda de tensão possui simetria de meia onda, ou seja, $f(t \pm T/2) = -f(t)$, isto implica que a componente CC da onda é praticamente igual a zero e que as ordens pares de harmônicos são insignificantes, fato este que pode ser comprovado na análise do espectro harmônico apresentado anteriormente.

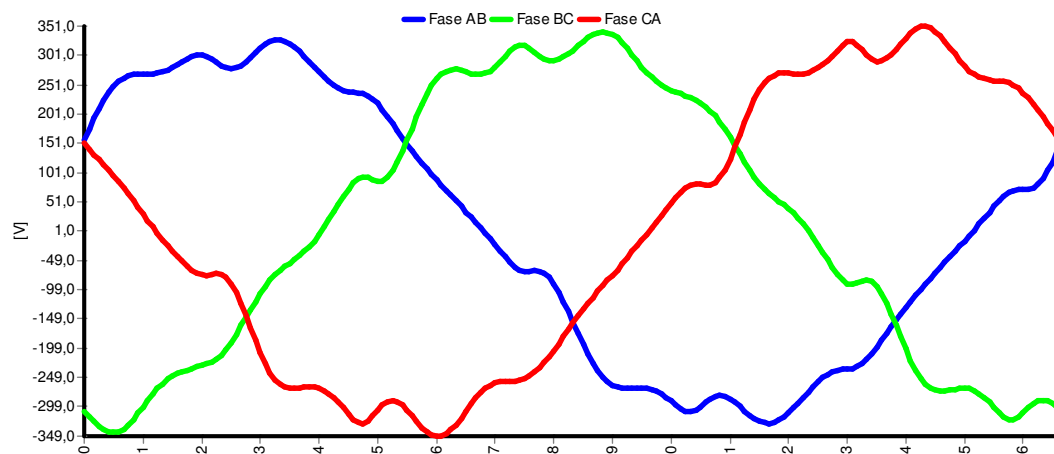


Figura 4.11- *Forma de onda da tensão no instante de maior distorção harmônica ao longo da medição.*

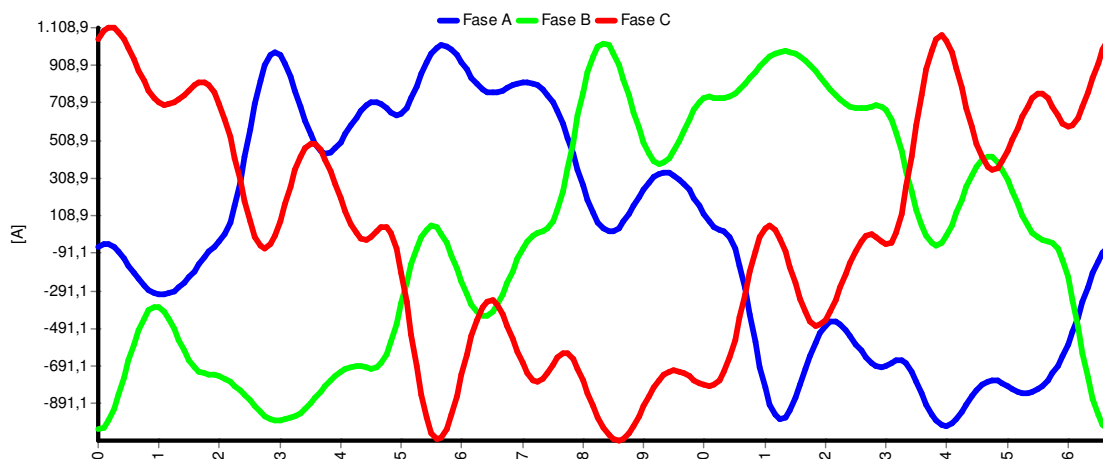


Figura 4.12- *Forma de onda da corrente no instante de maior distorção harmônica ao longo da medição.*

4.3 SIMULAÇÕES DO CASO BASE

O caso base constitui na simulação digital do sistema elétrico da empresa indicada no item 4.2.1 e de acordo com os dados obtidos e as medições

realizadas. Na figura 4.13 verifica-se o diagrama unifilar do sistema elétrico da empresa. Conforme mencionado anteriormente, a empresa possui um transformador de entrada que alimenta todas as cargas da empresa representada por uma fonte geradora de harmônicos que simula as cargas não-lineares e por uma carga do tipo RL que simula o restante das cargas do sistema elétrico.

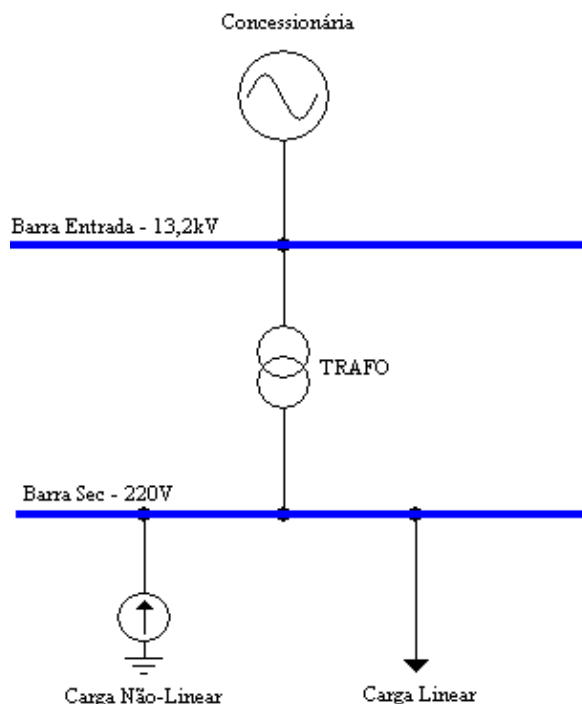


Figura 4.13- Diagrama unifilar do caso simulado.

Para determinação do valor da potência aparente da carga foi considerado da tabela 4.3 o máximo valor de potência ativa (205,79kW) e o máximo valor de potência reativa (110,98kVAr), de onde se obteve a potência aparente do período de medição (233,8kVA) desconsiderando a potência de distorção. Isto se faz necessário para que o estudo seja baseado no maior carregamento do circuito e as soluções adotadas sejam eficazes para todas as outras condições de carregamento. As correntes inseridas na fonte que representa a carga não-linear são as apresentadas na tabela 4.5, estas são

idênticas às medidas em campo com probabilidade de P95. A carga linear (RL) produz amortecimento natural do circuito, fazendo com que os valores de distorção de tensão e corrente simulados, sejam os mais próximos possíveis dos valores obtidos nas medições. Neste caso, a relação obtida foi de aproximadamente 43% da potência para as cargas não-lineares e 57% para as cargas lineares.

Tabela 4-5: Componentes harmônicas presentes no secundário do transformador

Geração Harmônica	
Ordem	Corrente harmônica [A]
2	3,84
3	8,99
4	2,31
5	165,47
6	3,63
7	115,49
8	6,05
9	11,75
10	11,47
11	117,43
12	3,46
13	41,29
14	2,52
15	4,53
16	1,22
17	13,82
18	1,02
19	8,79
20	0,91
21	1,45
22	0,75
23	4,91
24	0,69
25	2,85
26	0,64
27	1,5
28	0,6
29	2,46
30	0,57
31	1,72

Das simulações, o espectro harmônico e a distorção harmônica total de tensão são apresentados na figura 4.14. Observa-se uma semelhança destes com os valores obtidos na medição (figuras 4.5; 4.6 e 4.7) onde se tem aproximadamente 8,2% de DTT. Assim, como nas medições, tem-se uma distorção individual de tensão mais pronunciada nas componentes de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a com valores percentuais bem próximos aos medidos e apresentados anteriormente.

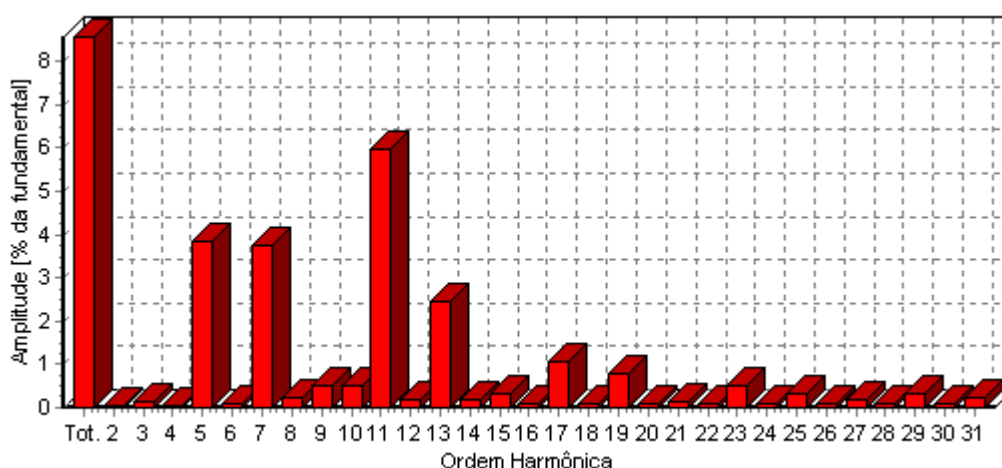


Figura 4.14- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado.

Consequentemente, a figura 4.15 mostra o espectro harmônico de corrente no secundário do transformador. Constata-se uma semelhança destes resultados com os valores medidos, tanto para a distorção harmônica total de corrente como também para as distorções individuais das componentes de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem.

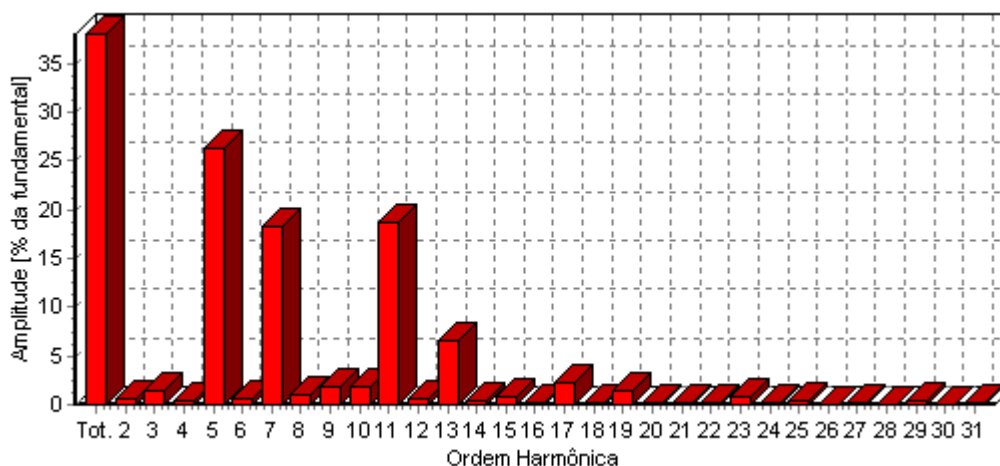


Figura 4.15- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado.

A figura 4.16 a seguir ilustra a impedância da barra no secundário do transformador. Como esperado, pelo fato de não existirem capacitores instalados, não existe(m) ressonância(s) na barra em estudo. Desta forma, verifica-se que a alta distorção de tensão é consequência apenas da alta injeção de correntes harmônicas pelas cargas não lineares, havendo portanto, a necessidade da instalação de filtros mitigadores de correntes harmônicas visando reduzir a distorção harmônica na barra para valores abaixo dos limites recomendados pelas normas.

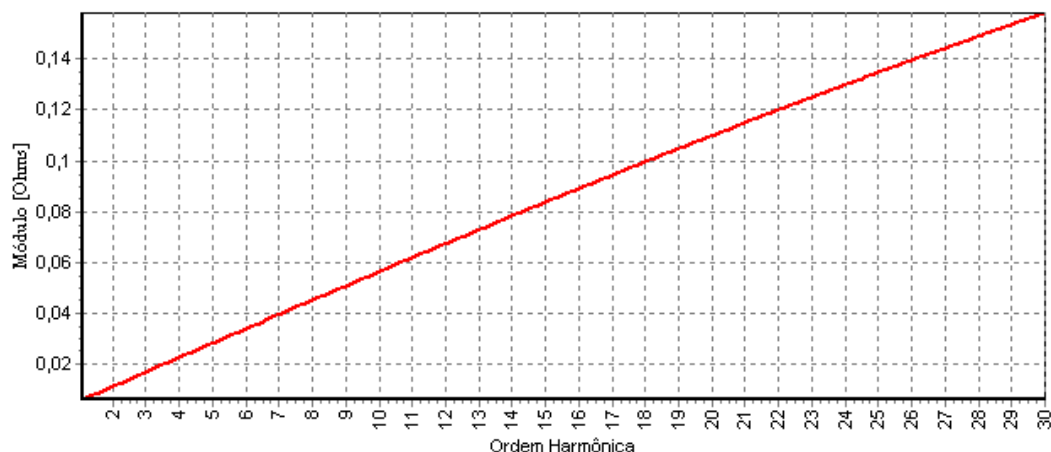


Figura 4.16- Impedância vista da barra no secundário do transformador.

Nas tabelas 4.6 e 4.7 a seguir são apresentados os resultados do fluxo de potência para o referido caso base. Apesar da presença de componentes harmônicas significativas que elevam o valor eficaz da tensão, percebe-se que a tensão eficaz encontra-se abaixo do valor nominal (tabela 4.6), donde se conclui que o valor da queda de tensão no transformador foi maior que 2,98V, que é a diferença entre a tensão nominal (220V) e a tensão simulada.

Tabela 4-6: Tensão, corrente e distorções na barra analisada

Tensão eficaz(V)	Corrente eficaz(A)	DTT(%)	DTI(%)
217,02	671,35	8,56	38,05

Tabela 4-7: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada

Potências e fator de potência			
Total		Fundamental	
Ativa(kW)	204,28	Ativa(kW)	204,45
Reativa(kVAr)	108,72	Reativa(kVAr)	115,87
Aparente(kVA)	252,35	Aparente(kVA)	235,00
Distorção(kVAr)	100,65		
FP	0,81	FP	0,87

Como esperado a potência aparente eficaz total é maior que para a fundamental, havendo uma potência de distorção devido à presença de harmônicos no sistema. Como apresentado, nas medições reais o fator de potência total resultou em valor menor que o fundamental. Os valores simulados tanto do fator de potência total como do fator de deslocamento estão bem coerentes com os valores medidos, valores estes, menores que o determinado por norma, havendo a necessidade da compensação reativa neste estudo de caso.

4.4 CASO 1 - BANCO DE CAPACITOR PURO

Neste caso, tem-se como objetivo simular os resultados do sistema em estudo após inserção de um banco de capacitores puro no secundário do transformador. O diagrama unifilar desta situação é apresentado na figura 4.17 a seguir.

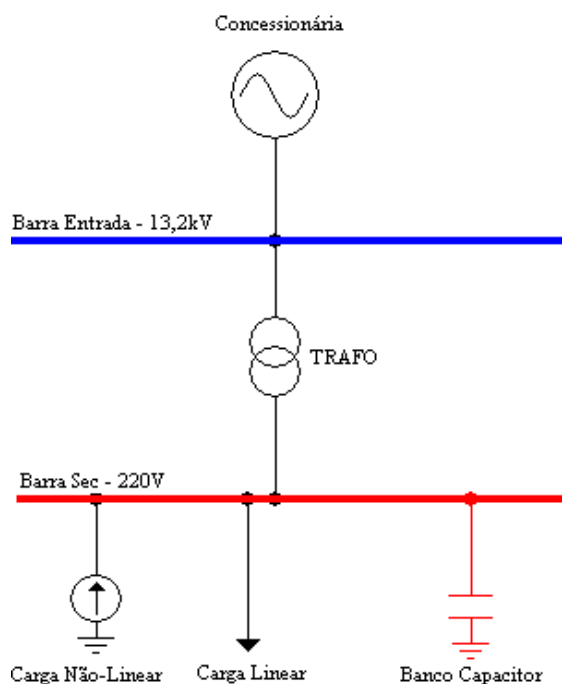


Figura 4.17- Diagrama unifilar com banco de capacitor puro.

No item a seguir, é determinado de forma simplificada o valor da potência reativa do banco de capacitores a ser inserida no secundário do transformador.

4.4.1 Cálculo simplificado da potência do banco

Para o cálculo da potência reativa do banco de capacitores, tomou-se como base os dados da simulação do caso base, que reflete de forma bem próxima os dados obtidos na medição, sendo eles:

- Potência ativa (P) = 204,28kW;
- Fator de potência (FP) = 0,81;

Desejando-se elevar o fator de potência para 0,95, a potência reativa do banco de capacitores a ser inserido no sistema deverá ser:

$$Q_C = P \cdot [\ln(\cos^{-1} 0,81) - \ln(\cos^{-1} 0,95)] = 80,7kVar \quad (4.1)$$

onde:

- Q_C – Potência reativa do banco de capacitores a ser inserido;

Considerando que a potência nominal comercial mais próxima de 80,7kVar é 90kVar, este será o valor adotado para o banco de capacitores. A tensão nominal será a própria tensão secundária do transformador, 220V.

4.4.2 Simulações digitais

Especificado o banco de capacitores, simulou-se a presença deste no secundário do transformador. Da simulação apresenta-se a figura 4.18, onde se constata uma enorme elevação da distorção harmônica individual de 11ª ordem e como consequência elevação da distorção total de tensão. Isto evidência a ocorrência de ressonância paralela no sistema ao se inserir o banco de capacitor puro conforme se constata de forma mais evidente na figura 4.19, onde se tem uma elevação da impedância, vista pela barra, superior na mesma ordem harmônica que sofreu elevação da distorção.

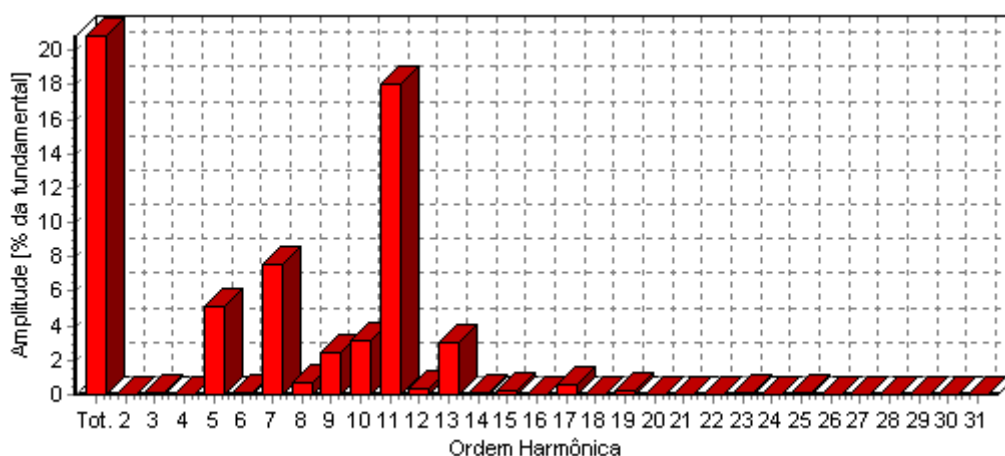


Figura 4.18- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com banco de capacitor puro.

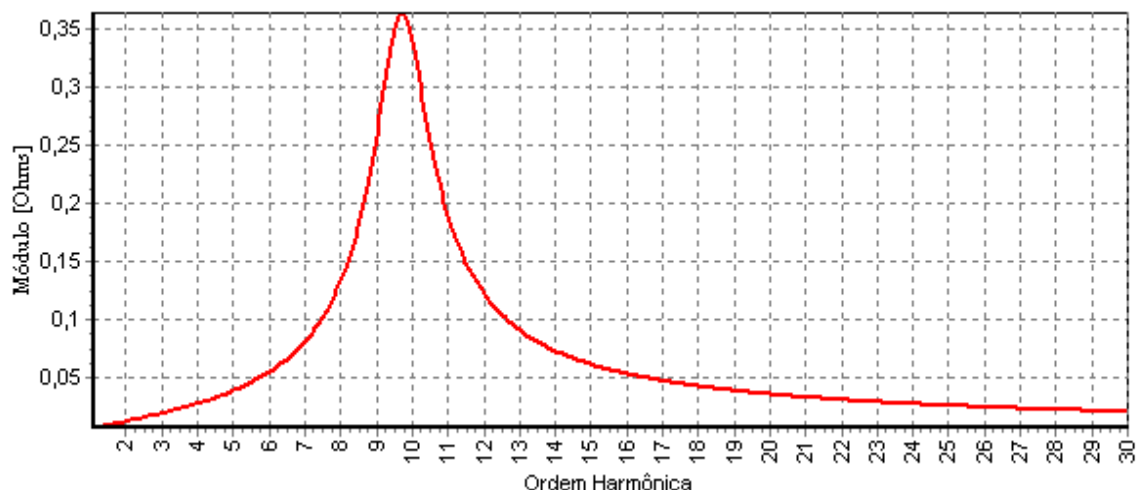


Figura 4.19- Impedância da barra no secundário do transformador simulado com banco de capacitor puro.

Ressalta-se que a ressonância ocorrida neste caso, causa também elevações da distorção harmônica total e individuais de corrente, principalmente da 11ª ordem. Neste sentido, a figura 4.20 apresenta o espectro harmônico total da corrente simulado da instalação após inserção do banco de capacitor.

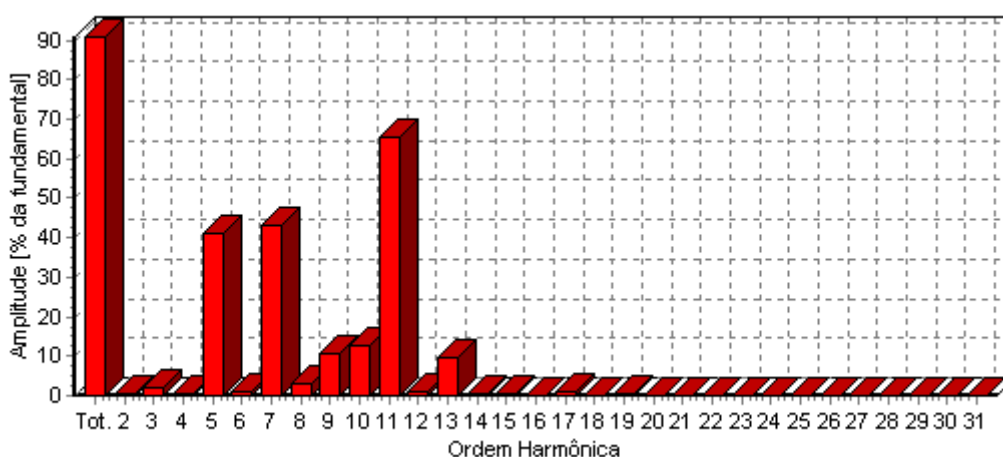


Figura 4.20- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com banco de capacitor puro.

Complementarmente, as tabelas 4.8 e 4.9 apresentam o resumo dos resultados obtidos na simulação deste caso. Dos resultados da tabela 4.8, observa-se que o valor eficaz de tensão assume um valor agora superior ao nominal (220V), porém acompanhado por uma enorme elevação de distorção de tensão resultado da ressonância ocorrida.

Tabela 4-8: Tensão, corrente e distorções na barra analisada

Tensão eficaz(V)	Corrente eficaz(A)	DTT(%)	DTI(%)
223,08	737,97	20,84	90,77

Tabela 4-9: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada

Potências e fator de potência			
Total		Fundamental	
Ativa(kW)	204,18	Ativa(kW)	204,89
Reativa(kVAr)	-10,38	Reativa(kVAr)	27,18
Aparente(kVA)	285,14	Aparente(kVA)	206,69
Distorção(kVAr)	198,76		
FP	0,716	FP	0,991

Outro fato relevante devido à ressonância é que a potência reativa passa a ter sinal negativo, pois como pode ser avaliada pela equação 2.15, a potência reativa depende do produto da corrente, tensão e do seno do ângulo entre elas, sendo que o seno deste ângulo pode às vezes ter sinal negativo. Neste caso, o que ocorreu foi que o décimo primeiro termo (11ª ordem) da equação 2.15 ficou negativo e com alto valor em módulo devido à ressonância, proporcionando no final para a potência reativa, uma somatória dos termos, negativa.

Outro fato interessante é que o fator de potência total diminuiu apesar do fator de deslocamento ter elevado, ou seja, o equipamento, que teria a função apenas de elevar o fator de potência real, causou o contrário e reduziu-o, devido ao aumento da distorção harmônica. Isto evidencia que a análise harmônica no sistema é uma necessidade, pois equipamentos que possuem função específica podem ter efeitos totalmente contrários ao esperado.

4.5 CASO 2 - FILTRO DESSINTONIZADO

Neste caso, foi simulada a inserção de um filtro dessintonizado no secundário do transformador. Como explicado no capítulo anterior, com a utilização deste tipo de banco evita-se a ocorrência de ressonância paralela na barra onde o mesmo é inserido, tal como ocorrido na seção anterior (caso 1).

Assim, o diagrama unifilar com a instalação do banco dessintonizado é apresentado na figura 4.21 a seguir. O modelo utilizado para o filtro dessintonizado é aquele representado por um circuito R, L e C série.

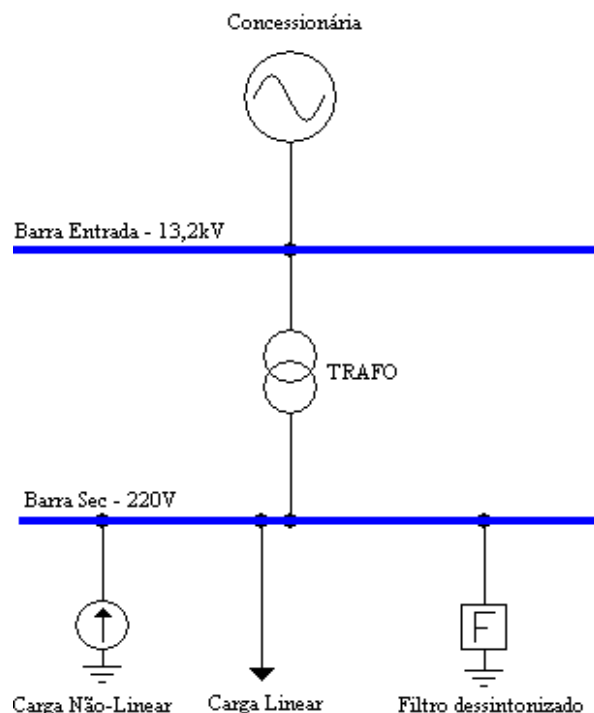


Figura 4.21- Diagrama unifilar com filtro dessintonizado instalado.

4.5.1 Especificação simplificada do filtro dessintonizado

Sabe-se que o filtro dessintonizado deve ser sintonizado abaixo da primeira harmônica existente [43]. Para este caso, nota-se na figura 4.15 do caso base que dentre as componentes harmônicas mais significativas, a quinta harmônica é a primeira componente harmônica presente no sistema em estudo. Sendo assim, a frequência adotada para o filtro dessintonizado será a frequência padrão de 226Hz (3,77ª ordem).

Para o cálculo da potência do filtro dessintonizado, procede-se da mesma forma como no item 4.4.1. Sendo assim, a potência adotado para o filtro dessintonizado em questão será de 90kVAr.

4.5.2 Simulações digitais

Analogamente ao caso anterior, a figura 4.22 mostra o espectro harmônico de tensão na barra após a inserção do filtro dessintonizado. Observa-se que o alto valor da distorção individual de tensão da 11ª ordem do caso anterior, não ocorre neste caso. Os valores de distorção individual de tensão da 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens e da distorção total de tensão continuam acima dos valores recomendados. Estes sofreram uma redução quase imperceptível, devido ao fato do filtro dessintonizado realizar uma insignificante filtragem das componentes harmônicas, principalmente àquelas mais próximas à sintonia adotada para o filtro.

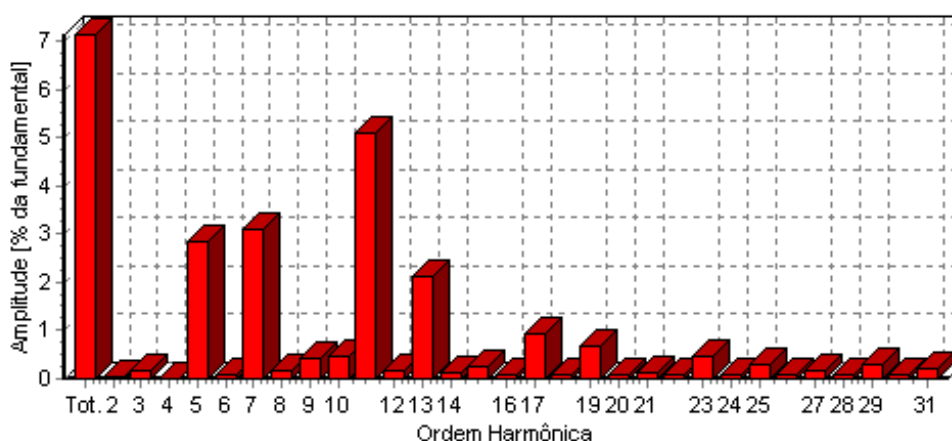


Figura 4.22- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtro dessintonizado.

O espectro harmônico de corrente apresentado na figura 4.23 mostra que apenas a componente de 5ª ordem sofreu uma pequena redução em relação ao caso base. Isto se deve ao fato de que, o banco foi sintonizado na frequência de 226Hz, apesar da impedância do filtro crescer com o aumento da frequência. O

valor da impedância para 5ª harmônica (figura 4.24) é de aproximadamente 0,026, ou seja, menor que o valor apresentado na figura 4.16 do caso base que é de aproximadamente 0,028. Com essa impedância menor, a tendência é fluir um maior conteúdo harmônico de quinta ordem para o filtro.

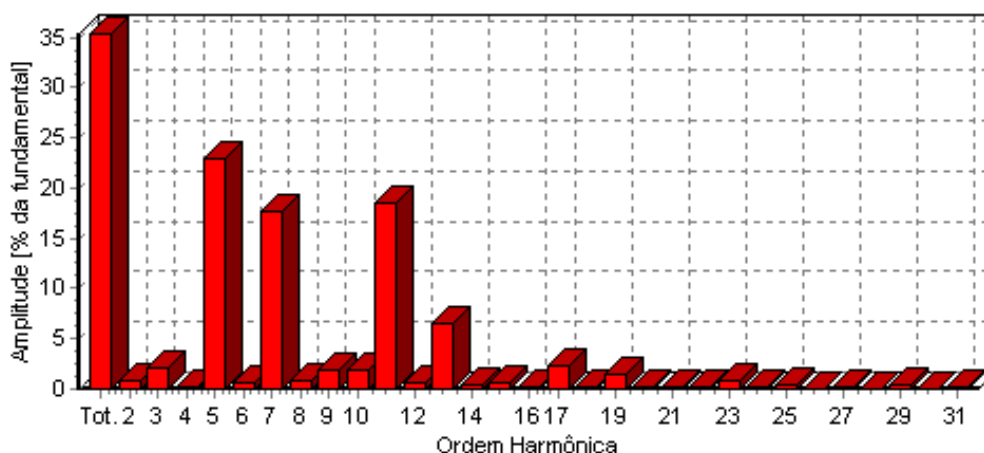


Figura 4.23- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtro dessintonizado.

A figura 4.24 apresenta a impedância vista da barra secundária do transformador versus a ordem harmônica. Percebe-se um baixo valor de impedância na ordem harmônica 3,77, que foi a frequência especificada para o filtro dessintonizado. Por outro lado, ocorre uma elevação da impedância na ordem 3,5, conhecida como anti-ressonância.

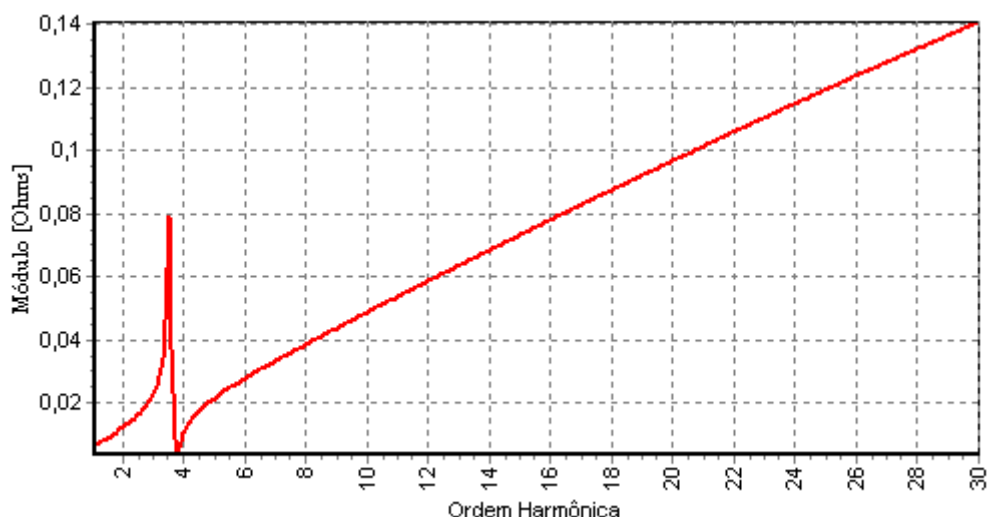


Figura 4.24- Impedância da barra no secundário do transformador simulado com filtro dessintonizado.

Na tabela 4.10 são apresentados os valores de tensão, corrente e distorções de tensão e corrente após a instalação do filtro dessintonizado. Observa-se que a corrente eficaz reduziu em relação ao caso base devido parte da corrente reativa estar sendo inserida na própria barra pelo banco, ou seja, passou de 671,35A para 579,68A. Como consequência, houve uma menor queda de tensão na instalação, e assim a tensão passou para 218,94V. A distorção harmônica total de tensão e corrente também sofreram uma redução discreta com a instalação do filtro dessintonizado, devido ao mesmo motivo anterior, isto é, o filtro mitigou um pequeno conteúdo de corrente harmônica.

Tabela 4-10: Tensão, corrente e distorções na barra analisada

Tensão eficaz(V)	Corrente eficaz(A)	DTT(%)	DTI(%)
218,94	579,68	7,13	35,32

Apresenta-se a seguir na tabela 4.11 os resultados obtidos na simulação do fluxo de potências para o 2º caso analisado.

Tabela 4-11: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada

Potências e fator de potência			
Total		Fundamental	
Ativa(kW)	204,85	Ativa(kW)	204,96
Reativa(kVAr)	22,32	Reativa(kVAr)	27,19
Aparente(kVA)	219,82	Aparente(kVA)	206,75
Distorção(kVAr)	76,56		
FP	0,932	FP	0,991

Dos resultados apresentados na tabela 4.11 verifica-se que tanto a potência reativa total como para a fundamental reduziram de 108,72kVAr e 115kVAr para 22,32kVAr e 27,19kVAr, respectivamente, ou seja, a redução foi aproximadamente igual ao valor da potência do banco (90kVAr). Em consequência, novamente pela redução da parcela do conteúdo harmônico mitigado pelo filtro dessintonizado, a potência de distorção reduziu. Assim, em consequência da redução da potência reativa e de distorção, a potência aparente também reduziu seu valor em relação ao caso base. Já o fator de deslocamento ficou , assim como no caso 1, acima de 0,92. No entanto, o fator de potência total aumentou, visto que o filtro dessintonizado não causou ressonância paralela no sistema em uma frequência com conteúdo harmônico de corrente presente.

Uma vez constatado o aumento do fator de potência com a inserção do filtro dessintonizado, pode-se concluir erroneamente que este aumento geraria um fator de potência acima daquele da norma brasileira, desprezando simplesmente os níveis de distorções harmônicas na barra. No entanto, isto não

se verifica na prática, pois pela equação (2.11) para elevar o fator de potência é necessário reduzir a potência aparente. Já a potência aparente, conforme equação (2.16), depende tanto da potência reativa quanto da potência de distorção, ou seja, em instalações com alto conteúdo harmônico, como é este caso, mesmo que a potência reativa atinja o valor zero, pode ocorrer um fator de potência abaixo dos limites aceitáveis, sendo então necessária a atenuação de parte do conteúdo harmônico para se obter fator de potência desejado.

4.6 CASO 3 - FILTRO HARMÔNICO PASSIVO SINTONIZADO

Conforme mencionado anteriormente, a redução do conteúdo harmônico nos sistemas elétricos se torna necessário não apenas para reduzir a distorção harmônica, mas também melhorar o fator de potência para enquadramento dentro dos limites estabelecidos pela legislação.

Para isto, foram inseridos filtros harmônicos sintonizados no secundário do transformador objetivando-se corrigir o fator de potência e reduzir a distorção harmônica na barra.

4.6.1 Especificação simplificada do filtro sintonizado

Das medições realizadas, verifica-se como correntes harmônicas predominantes, aquelas nas frequências de 300Hz, 420Hz e 660Hz, ou seja, na 5^a, 7^a e 11^a harmônica. Baseando-se nestas informações, foi determinada a frequência de sintonia dos filtros a serem alocados no secundário do transformador.

Neste caso, foram inseridos filtros harmônicos sintonizados de 5^a, 7^a e 11^a ordens no secundário do transformador com o objetivo de corrigir o fator de potência e reduzir a distorção harmônica na barra. Inicialmente, utilizou-se a mesma potência calculada no item 4.4.1 (90kVAr). Desejando-se valores iguais para os capacitores dos filtros, a fim de obter uma maior flexibilidade na manutenção dos equipamentos e o estoque único de capacitores, dividiu-se a potência total igualmente entre os três filtros, ou seja, 30kVAr em 220V para cada filtro. Sendo assim, conforma referência [5], a impedância do filtro será determinada como:

$$X_{filt} = \frac{V^2}{Q} = \frac{220^2}{30000} = 1,6133\Omega \quad (4.2)$$

onde:

- X_{filt} é a diferença entre a reatância capacitiva do banco e a reatância indutiva do reator, ambas na frequência fundamental;

$$X_{filt} = X_{cap} - X_L \quad (4.3)$$

Para acomodar eventuais futuras dessintonias, a frequência de sintonia dos filtros de 5^a, 7^a e 11^a ordem, será respectivamente para as ordens 4,8, 6,8 e 10,8. Para sintonizar os filtros nestas ordens harmônicas, utilizando-se da equação 3.6 apresentada no capítulo 3, obtém-se:

$$X_{cap(5)} = 4,8^2 \cdot X_L \quad (4.4)$$

$$X_{cap(7)} = 6,8^2 \cdot X_L \quad (4.5)$$

$$X_{cap(11)} = 10,8^2 \cdot X_L \quad (4.6)$$

onde:

- $X_{cap(5)}$ – Reatância capacitiva do filtro de 5ª ordem;
- $X_{cap(7)}$ – Reatância capacitiva do filtro de 7ª ordem;
- $X_{cap(11)}$ – Reatância capacitiva do filtro de 11ª ordem;

Substituindo-se as equações 4.4, 4.5 e 4.6 em 4.3:

$$X_{cap(5)} = \frac{h^2 \cdot X_{filt}}{h^2 - 1} = \frac{4,8^2 \cdot 1.6133}{4,8^2 - 1} = 1,6865\Omega \quad (4.7)$$

$$X_{cap(7)} = \frac{h^2 \cdot X_{filt}}{h^2 - 1} = \frac{6,8^2 \cdot 1.6133}{6,8^2 - 1} = 1,649\Omega \quad (4.8)$$

$$X_{cap(11)} = \frac{h^2 \cdot X_{filt}}{h^2 - 1} = \frac{10,8^2 \cdot 1.6133}{10,8^2 - 1} = 1,627\Omega \quad (4.9)$$

Inserindo os valores obtidos para as reatâncias capacitivas dos filtros nas equações 4.4, 4.5 e 4.6, obtêm-se:

$$X_{L(5)} = \frac{X_{cap(5)}}{h^2} = \frac{1,6865}{4,8^2} = 0,0732\Omega \quad (4.10)$$

$$X_{L(7)} = \frac{X_{cap(7)}}{h^2} = \frac{1,649}{6,8^2} = 0,03566\Omega \quad (4.11)$$

$$X_{L(11)} = \frac{X_{cap(11)}}{h^2} = \frac{1,627}{10,8^2} = 0,01395\Omega \quad (4.12)$$

onde:

- $X_{L(5)}$ – Reatância indutiva do filtro de 5ª ordem;
- $X_{L(7)}$ – Reatância indutiva do filtro de 7ª ordem;
- $X_{L(11)}$ – Reatância indutiva do filtro de 11ª ordem;

Considerando 5% de sobretensão permanente no sistema, tem-se:

$$V = 1,05.220 = 231V \quad (4.13)$$

Sendo assim, a corrente de 60Hz nos filtros será:

$$I_f = \frac{231/\sqrt{3}}{1,6133} = 82,67A \quad (4.13)$$

Obtida a corrente que circulará no capacitor do filtro é possível calcular a potência destes capacitores:

$$Q_{cap(5)} = 3.I_f^2.X_{cap(5)} = 3.82,67^2.1,6865 = 34,56kVAr \quad (4.14)$$

$$Q_{cap(7)} = 3.I_f^2.X_{cap(7)} = 3.82,67^2.1,649 = 33,81kVAr \quad (4.15)$$

$$Q_{cap(11)} = 3.I_f^2.X_{cap(11)} = 3.82,67^2.1,627 = 33,36kVAr \quad (4.16)$$

onde:

- $Q_{cap(5)}$ – Potência reativa do capacitor do filtro de 5ª ordem;
- $Q_{cap(7)}$ – Potência reativa do capacitor do filtro de 7ª ordem;
- $Q_{cap(11)}$ – Potência reativa do capacitor do filtro de 11ª ordem;

As tensões fase-fase nos capacitores dos filtros serão:

$$V_{cap(5)} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \cdot V_{filtro} = \frac{4,8^2}{4,8^2 - 1} \cdot 231 = 241,5\Omega \quad (4.14)$$

$$V_{cap(7)} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \cdot V_{filtro} = \frac{6,8^2}{6,8^2 - 1} \cdot 231 = 236,1\Omega \quad (4.15)$$

$$V_{cap(11)} = \frac{h^2}{h^2 - 1} \cdot V_{filtro} = \frac{11,8^2}{11,8^2 - 1} \cdot 231 = 232,7\Omega \quad (4.16)$$

onde:

- $V_{cap(5)}$ – Tensão fase-fase no capacitor do filtro de 5ª ordem;
- $V_{cap(7)}$ – Tensão fase-fase no capacitor do filtro de 7ª ordem;
- $V_{cap(11)}$ – Tensão fase-fase no capacitor do filtro de 11ª ordem;

Considerando que as respectivas correntes harmônicas de cada ordem penetrem totalmente em cada respectivo filtro e sabendo as componentes harmônicas presentes no secundário do transformador, conforme tabela 4.5, as correntes eficazes totais (fundamental + harmônicos) nos filtros serão:

$$I_{total(5)} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = \sqrt{82,67^2 + 165,47^2} = 185,0A \quad (4.17)$$

$$I_{total(7)} = \sqrt{I_1^2 + I_7^2} = \sqrt{82,67^2 + 115,49^2} = 142,0A \quad (4.18)$$

$$I_{total(11)} = \sqrt{I_1^2 + I_{11}^2} = \sqrt{82,67^2 + 117,43^2} = 143,6A \quad (4.19)$$

onde:

- $I_{total(5)}$ – Corrente total no do filtro de 5^a ordem;
- $I_{total(7)}$ – Corrente total no do filtro de 7^a ordem;
- $I_{total(11)}$ – Corrente total no do filtro de 11^a ordem;

A norma da ABNT, NBR IEC 60831-1 [25], determina que os capacitores de potência para filtros devam ser capazes de suportar as correntes calculadas acima. Sendo assim, com estes valores é possível determinar as mínimas potências dos capacitores dos filtros em questão:

$$Q_{cap.min(5)} = 3 \cdot I_{total(5)}^2 \cdot X_{cap(5)} = 3 \cdot 185^2 \cdot 1,6865 = 173,2kVAr \quad (4.20)$$

$$Q_{cap.min(7)} = 3 \cdot I_{total(7)}^2 \cdot X_{cap(7)} = 3 \cdot 142^2 \cdot 1,649 = 100kVAr \quad (4.21)$$

$$Q_{cap.min(11)} = 3 \cdot I_{total(11)}^2 \cdot X_{cap(11)} = 3 \cdot 143,6^2 \cdot 1,627 = 100,7kVAr \quad (4.22)$$

onde:

- $Q_{cap.min(5)}$ – Potência reativa mínima do capacitor de potência do filtro de 5^a ordem;

- $Q_{cap.min(7)}$ – Potência reativa mínima do capacitor de potência do filtro de 7ª ordem;
- $Q_{cap.min(11)}$ – Potência reativa mínima do capacitor de potência do filtro de 11ª ordem;

Obtidas as potências reativas mínimas nos capacitores dos filtros harmônicos é necessário recalcular também as tensões mínimas nestes, afim de não alterar as reatâncias dos capacitores, sendo determinadas da seguinte maneira:

$$V_{cap.min(5)} = V_{cap(5)} \cdot \sqrt{\frac{Q_{cap.min(5)}}{Q_{cap(5)}}} = 231 \cdot \sqrt{\frac{173,2}{34,56}} = 517,13V \quad (4.20)$$

$$V_{cap.min(7)} = V_{cap(7)} \cdot \sqrt{\frac{Q_{cap.min(5)}}{Q_{cap(5)}}} = 231 \cdot \sqrt{\frac{100}{33,81}} = 397,3V \quad (4.21)$$

$$V_{cap.min(11)} = V_{cap(11)} \cdot \sqrt{\frac{Q_{cap.min(11)}}{Q_{cap(11)}}} = 231 \cdot \sqrt{\frac{100,7}{33,36}} = 401,34V \quad (4.22)$$

onde:

- $V_{cap.min(5)}$ – Tensão fase-fase mínima do capacitor de potência do filtro de 5ª ordem;
- $V_{cap.min(7)}$ – Tensão fase-fase mínima do capacitor de potência do filtro de 7ª ordem;
- $V_{cap.min(11)}$ – Tensão fase-fase mínima do capacitor de potência do filtro de 11ª ordem;

A escolha da potência reativa de cada filtro deve obedecer a critérios de custo e de eficiência de filtragem. O filtro de custo mínimo é aquele que, a uma determinada potência reativa fundamental, apresenta o menor custo. Sendo assim, a escolha das potências reativas dos filtros, consistiu-se de um procedimento técnico, buscando-se obter, o menor custo do filtro, considerando também uma boa eficiência de filtragem, o que ocorre evitando-se a saturação dos reatores.

Disto concluiu-se que a melhor relação entre a eficiência e o custo do filtro é obtida para uma potência reativa de 45kVAr em 220V para cada filtro em questão. De posse desta nova potência, procedeu-se novamente os cálculos mencionados nesta seção obtendo as seguintes especificações dos filtros, já considerando valores comerciais:

Filtro de 5ª ordem:

$$Q_{cap(5)} = 180kVAr \quad (4.23)$$

$$V_{cap(5)} = 440V \quad (4.24)$$

$$X_{L(5)} = 0,1238mH \quad (4.25)$$

Filtro de 7ª ordem:

$$Q_{cap(7)} = 180kVAr \quad (4.26)$$

$$V_{cap(7)} = 440V \quad (4.27)$$

$$X_{L(7)} = 0,0617mH \quad (4.28)$$

Filtro de 11ª ordem:

$$Q_{cap(11)} = 180kVar \quad (4.29)$$

$$V_{cap(11)} = 440V \quad (4.30)$$

$$X_{L(11)} = 0,0245mH \quad (4.31)$$

Neste sentido, a figura 4.25 a seguir apresenta o diagrama unifilar da instalação com os filtros inseridos na baixa tensão, sendo estes modelados como circuitos R, L e C série.

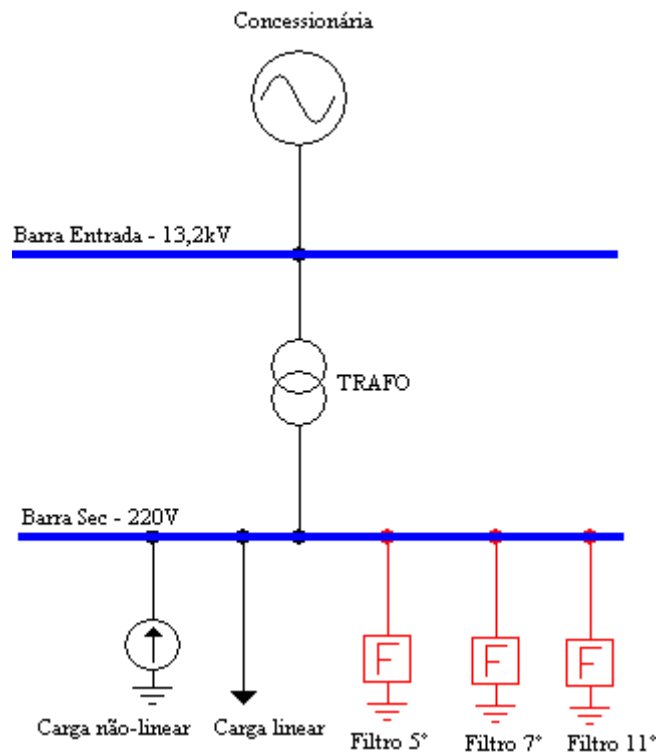


Figura 4.25- Diagrama unifilar com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens.

4.6.2 Simulações digitais

Como resultados de simulação a figura 4.26 mostra o espectro harmônico de tensão após a inserção dos filtros harmônicos na barra. Percebe-se uma significativa redução da distorção individual de tensão na 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens. A distorção harmônica total de tensão chegou a um percentual de aproximadamente 2,63%, que está bem abaixo do recomendado pelo IEEE que é de 5%.

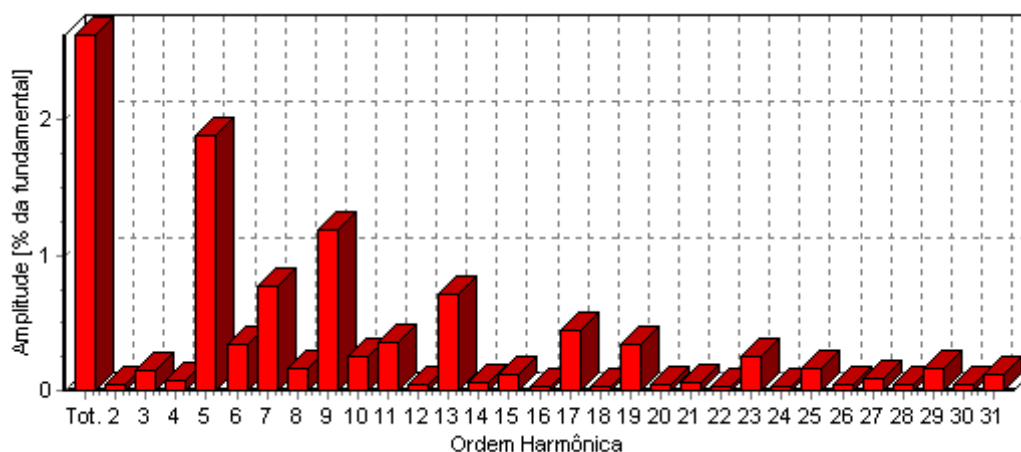


Figura 4.26- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens.

A figura 4.27 apresenta o comportamento da impedância da barra versus ordem harmônica com a inserção dos filtros. Como esperado, nas ordens harmônicas de sintonia dos filtros, a impedância comporta-se com valor praticamente nulo e, mesmo para frequências superiores a 660Hz, observa-se valores de impedância baixos, principalmente nas frequências mais próximas a ordem de sintonia do filtro de 11ª ordem. Isto justifica a razão da redução da 13ª ordem, mesmo sem a inserção de nenhum filtro sintonizado nesta frequência.

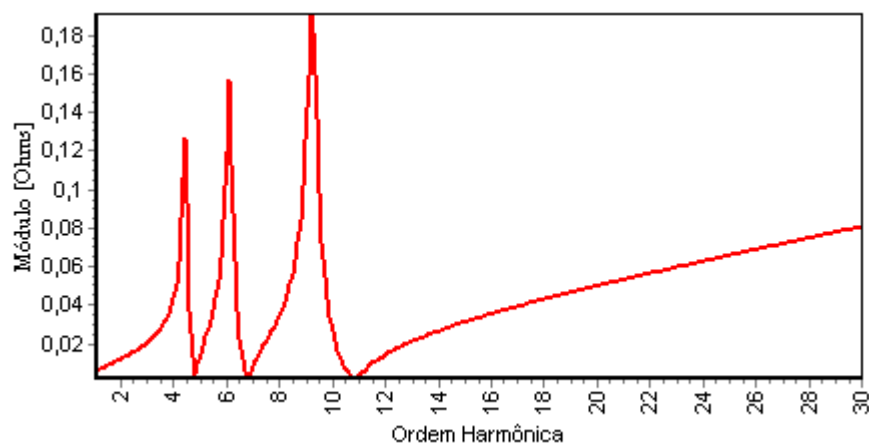


Figura 4.27- Impedância da barra no secundário do transformador simulado com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens.

Outro fato importante que deve ser mencionado no comportamento da impedância, é a ocorrência de ressonância paralela em frequências abaixo das frequências de sintonia de cada filtro. Isto possibilita informar que com a instalação dos filtros, de que o filtro de 7ª ordem não poderá ser inserido no sistema com ausência do filtro de 5º, e o filtro de 11º não poderá ser inserido no sistema ausente do filtro de 7º ordem. Caso contrário, poderá ocorrer ressonância paralela em uma mesma frequência onde exista um alto conteúdo harmônico, ou seja, ao invés do equipamento reduzir o conteúdo harmônico, ele causaria o aumento do conteúdo harmônico resultando a queima do equipamento devido a altas correntes resultantes no reator.

A figura 4.28 apresenta o espectro harmônico de corrente simulado após a inserção dos referidos filtros. Percebe-se nesta uma significativa redução tanto dos valores de distorção harmônica individual, quanto da distorção harmônica total de corrente, em comparação com os valores inicialmente monitorados.

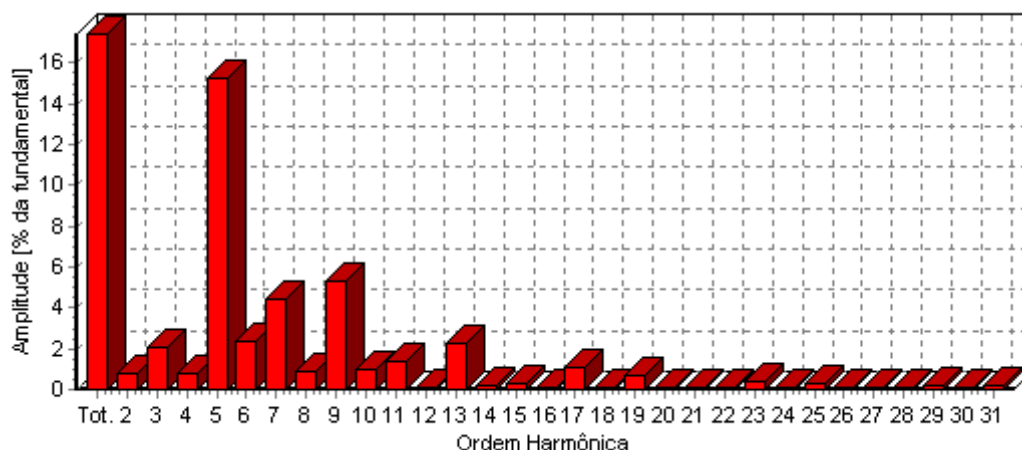


Figura 4.28- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens.

Na tabela 4.12 a seguir são apresentados os resultados da simulação referente às grandezas de tensão, corrente e distorções de tensão e corrente após a instalação dos filtros harmônicos. Como mencionado no capítulo 3, na frequência 60Hz o filtro fornece potência reativa para o sistema e, como foi necessário uma potência maior dos filtros para suportar as correntes harmônicas circulantes, os filtros proporcionaram uma corrente eficaz ainda menor que no caso anterior e, conseqüentemente a tensão eficaz ficou ainda mais próxima da nominal. Observa-se também que a distorção harmônica de tensão reduziu de 8,56%(caso base) para 2,63%, resultando níveis abaixo dos limites recomendados. Isto nos mostra a eficácia do filtro na instalação, conforme será avaliado no decorrer deste capítulo.

Tabela 4-12: Tensão, corrente e distorções na barra analisada

Tensão eficaz(V)	Corrente eficaz(A)	DTT(%)	DTI(%)
219,56	549,24	2,63	17,42

A tabela 4.13 apresenta os resultados simulados relativos às potências resultantes após a instalação dos filtros. Devido à elevada potência eficaz resultante dos três filtros, a potência reativa reduziu à níveis de se tornar negativa, ou seja, os filtros estão fornecendo toda a potência reativa necessária à empresa sendo que 19,39kVAr é disponibilizada para a concessionária. Isto é uma vantagem e permitido pela concessionária desde que se mantenha o fator de potência acima de 0,92 capacitivo no período reservado (0:00 às 6:00 horas). A potência de distorção também reduziu bastante e, conseqüentemente a potência aparente também. Pode-se observar também que o equipamento possibilitou a compensação reativa, resultando em um fator de potência de 0,981.

Tabela 4-13: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada

Potências e fator de potência			
Total		Fundamental	
Ativa(kW)	204,84	Ativa(kW)	204,86
Reativa(kVAr)	-19,39	Reativa(kVAr)	-18,5
Aparente(kVA)	208,87	Aparente(kVA)	205,7
Distorção(kVAr)	35,94		
FP	-0,981	FP	-0,996

Observa-se da tabela anterior e através da equação (2.16) que quanto menor a potência de distorção, os valores da potência aparente fundamental e total tornam-se cada vez mais próximos.

4.7 CASO 4 - FILTRO ATIVO

Como anteriormente, neste caso foi simulada a instalação de um filtro ativo no secundário do transformador. O filtro ativo é simulado no programa como uma fonte de corrente onde o valor da corrente de cada componente harmônica indesejável calculada anteriormente é inserido com defasagem de 180° da corrente harmônica presente no sistema. Assim, é possível obter o filtro capaz de reduzir o conteúdo harmônico para os níveis desejados, sendo neste caso um filtro ativo capaz de reduzir a DTT para níveis próximos aos obtidos com inserção dos filtros passivos.

4.7.1 Especificação simplificada do filtro ativo

De acordo com as particularidades do filtro ativo, este pode ser dimensionado para eliminar apenas determinadas ordens harmônicas principais ou reduzir igualmente e percentualmente cada componente harmônica presente. Este último foi utilizado para os cálculos do filtro ativo necessário neste caso.

Para a especificação do filtro ativo necessário para reduzir a distorção harmônica total de corrente é necessário conhecer os módulos de cada componente presente no sistema.

Com os dados da tabela 4.5 é possível calcular o valor eficaz das componentes harmônicas, conforme expressão a seguir [44]:

$$I_{h.rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=31} I_h^2} = 238,73[\text{A}] \quad (4.1)$$

onde:

- $I_{h.rms}$ – Corrente eficaz das componentes harmônicas;

Conforme mencionada anteriormente, inicialmente deseja-se determinar a DTT próxima ao valor obtido com os filtros passivo, ou seja, 2,53%. Para obter este valor com o filtro ativo é necessário especificar o quanto este deve atenuar nas corrente harmônicas existentes, onde esta atenuação é conhecida como fator de atenuação (FA). De posse do fator de atenuação, determinam-se os módulos de cada componente que o filtro ativo deve inserir no sistema para que, após o fluxo harmônico do sistema, obtenha-se a distorção harmônica total desejada.

Infelizmente não existe uma relação linear exata entre o valor desejado de DTT ($DTT_{desejado}$) e o valor existente da distorção de tensão antes da instalação do filtro ativo (DTT_{antes}), para se obter o valor do fator de atenuação de corrente (FA). Isto se deve ao fato de que a distorção harmônica total de tensão depende não apenas da corrente, mas também da impedância do sistema. No entanto, utilizando-se desta relação é possível obter um valor inicial do filtro bem próximo, se não igual, ao necessário para obter aquele valor desejado. Sendo assim, tem-se:

$$FA = 1 - \frac{DTT_{desejado}}{DTT_{antes}} = 1 - \frac{2,53\%}{8,56\%} = 0,704 \quad (4.2)$$

onde:

- FA – Fator de atenuação do filtro ativo;

Desta forma, o filtro ativo deverá ter uma capacidade de injeção de corrente de:

$$I_{filtro} = FA \times I_{h.rms} = 0,704 \times 238,73 = 168[A] \quad (4.3)$$

onde:

- I_{filtro} – Corrente do filtro ativo;

Considerando que a corrente nominal comercial do filtro ativo maior mais próxima de 168[A] é 200[A], este será o valor adotado para o filtro ativo. A tensão nominal será a própria tensão secundária do transformador, 220V.

Sendo assim, o fator de atenuação que será obtido com o filtro de 200A será:

$$FA = \frac{I_{filtro}}{I_{h.rms}} = \frac{200}{238,73} = 0,838 \quad (4.3)$$

É importante salientar que o filtro ativo é capaz de fornecer determinada quantidade de potência reativa para o sistema conforme tabela 4.14, informada por um fabricante de filtro ativo, tendo em vista a presença de capacitores internamente ao mesmo. Para a simulação desta potência reativa, foi utilizado um filtro dessintonizado em uma frequência de 160Hz, pois a influência deste na impedância do sistema é insignificante e consequentemente não interferindo nos resultados do DTT, DTI e potência de distorção.

Tabela 4-14: Potência reativa fornecida pelos filtros ativos

Potência reativa fornecida em 50 / 60 Hz					
Tensão	FA-0025A	FA-0050[A]	AF-0100[A]	AF-0150[A]	AF-0200[A]
220	3,2	6,5	13	19,4	25,9
380	9,9	19,7	39,5	59,2	79
440	12,8	25,5	51	76,5	101,9
480	15,6	31,3	62,5	93,8	124,8

O diagrama unifilar do sistema com o filtro ativo inserido é apresentada na figura 4.29 abaixo.

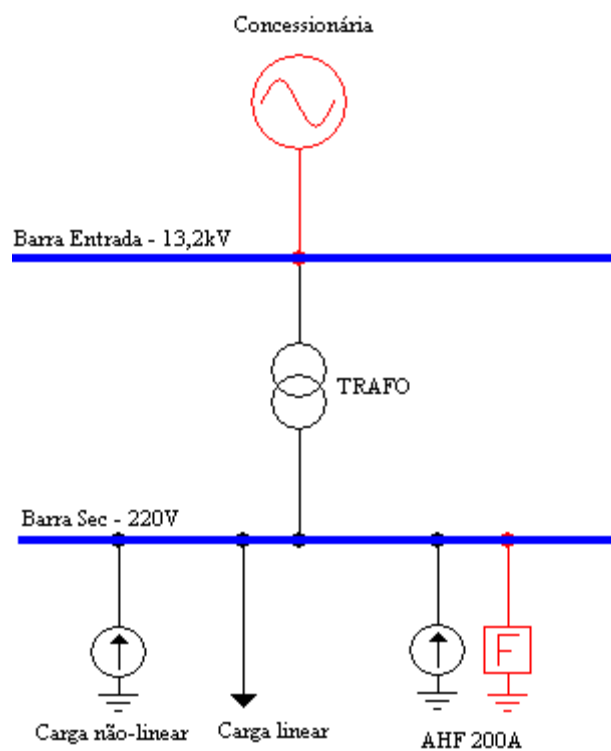


Figura 4.29- Diagrama unifilar com filtro ativo de 200A.

4.7.2 Simulações digitais

Como resultados de simulação a figura 4.30 a seguir apresenta o espectro da distorção harmônica de tensão, simulado com filtro ativo de 200A instalado. Observa-se que o índice DTT resultou em 1,49% e as distorções individuais ficaram todas menores ou iguais a 1%. Comparando-se com a figura 4.26, percebe-se que a instalação do filtro ativo gerou níveis de DTT um pouco inferiores aos gerados com a instalação dos filtros passivos. Por outro lado, as distorções individuais também resultaram em percentuais menores, exceto a de 11ª ordem mostrando que nesta ordem harmônica o filtro passivo possui um maior percentual de redução que o do filtro ativo.

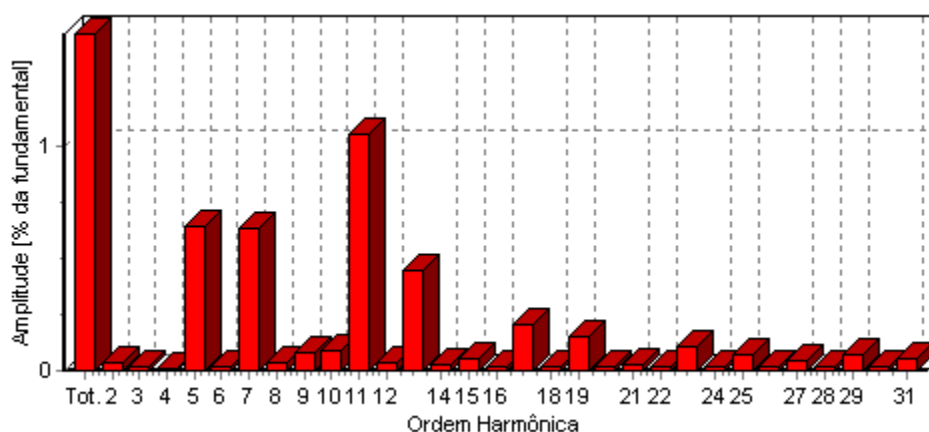


Figura 4.30- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtro ativo de 200A.

Para o espectro de corrente apresentado na figura 4.31 a seguir, percebe-se que a DTI e as distorções individuais resultaram em uma redução significativa em relação ao caso base. Novamente, comparando-se com a figura 4.28, as distorções se mostraram pouco menores.

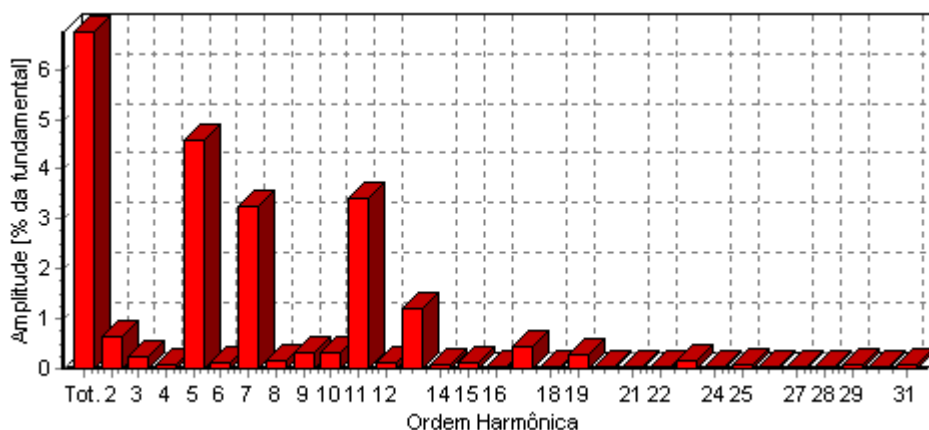


Figura 4.31- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtro ativo de 200A.

A tabela 4.15 apresenta os resultados da simulação no que tange à tensão eficaz, corrente e distorção na barra. Desta tabela, verifica-se uma redução na corrente eficaz devido ao fornecimento de reativos pelo filtro ativo, e que também é possível notar que a tensão eficaz ficou menor que no caso base. Salienta-se que neste caso, não significa que houve uma maior queda de tensão no transformador, pois a tensão eficaz depende também das componentes harmônicas presentes. Como o filtro causou uma redução deste conteúdo harmônico, consequentemente a tensão eficaz teve seu valor reduzido mesmo com a provável redução da queda de tensão devido à redução da corrente.

Assim, comparando com os resultados obtidos com a inserção dos filtros passivos, verifica-se que a corrente eficaz na instalação do filtro ativo ficou maior e a tensão eficaz menor. Isto se justifica pelo fato dos filtros passivos estarem fornecendo toda a potência reativa para o sistema, reduzindo ao máximo a queda de tensão no transformador.

Tabela 4-15: Tensão, corrente e distorções na barra analisada

Tensão eficaz(V)	Corrente eficaz(A)	DTT(%)	DTI(%)
216,79	610,16	1,49	6,75

A tabela 4.16 abaixo apresenta os valores das potências e do fator de potência simulados com a inserção do filtro ativo. Como era de se esperar, o filtro ativo reduziu significativamente a potência de distorção, e apenas uma pequena parcela da potência reativa. Já o fator de potência, apesar de aumentar em relação ao caso base, continua abaixo dos limites estabelecidos. Isto pode ser justificado pela limitação da potência reativa fornecida pelo filtro ativo.

Tabela 4-16: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada

Potências e fator de potência			
Total		Fundamental	
Ativa(kW)	208,76	Ativa(kW)	208,77
Reativa(kVAr)	92,83	Reativa(kVAr)	93,05
Aparente(kVA)	229,11	Aparente(kVA)	228,56
Distorção(kVAr)	17,08		
FP	0,911	FP	0,913

4.8 CASO 5 - FILTRO ATIVO E FILTRO DESSINTONIZADO (FILTRO HÍBRIDO)

Objetivando obter resultados satisfatórios tanto para distorção harmônica quanto para o fator de potência, assim como obtido no caso 3, foi simulado neste

último caso a instalação de um filtro híbrido, ou seja, um filtro ativo combinado com um banco dessintonizado.

4.8.1 Especificação simplificada do filtro híbrido

O filtro ativo utilizado foi o mesmo do caso anterior, ou seja, 200A. O cálculo da potência do banco dessintonizado foi calculado através dos resultados das potências obtidas no caso 4, conforme definido a seguir:

- Potência ativa (P) = 208,76kW;
- Fator de potência (FP) = 0,911;

Desejando-se elevar o fator de potência para 0,95, a potência reativa do banco de capacitores a ser inserido no sistema deverá ser:

$$Q_C = P \cdot [\tan(\cos^{-1} 0,911) - \tan(\cos^{-1} 0,95)] = 26kVAr \quad (4.1)$$

onde:

- Q_C – Potência reativa do banco de capacitores a ser inserido;

Considerando que a potência nominal comercial mais próxima de 26kVAr é 30kVAr, este será o valor adotado para o banco de capacitores. A tensão nominal será a própria tensão secundária do transformador, 220V.

A figura 4.32 abaixo mostra o diagrama unifilar deste novo caso.

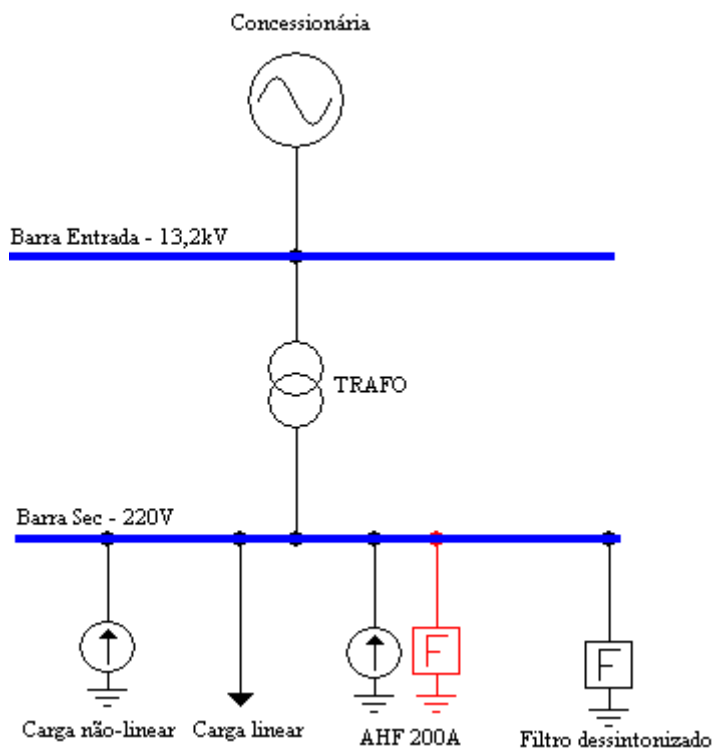


Figura 4.32- Diagrama unifilar com filtro híbrido.

4.8.2 Simulações digitais

As figuras 4.33 e 4.34 a seguir apresentam o espectro harmônico de tensão e corrente, respectivamente, simulados após a instalação do filtro híbrido. Os resultados são semelhantes aos obtidos no caso 4, pois como visto anteriormente o banco dessintonizado é incapaz de filtrar significativamente as correntes harmônicas e também não causa ressonância paralela nas frequências com conteúdo harmônico expressivo.

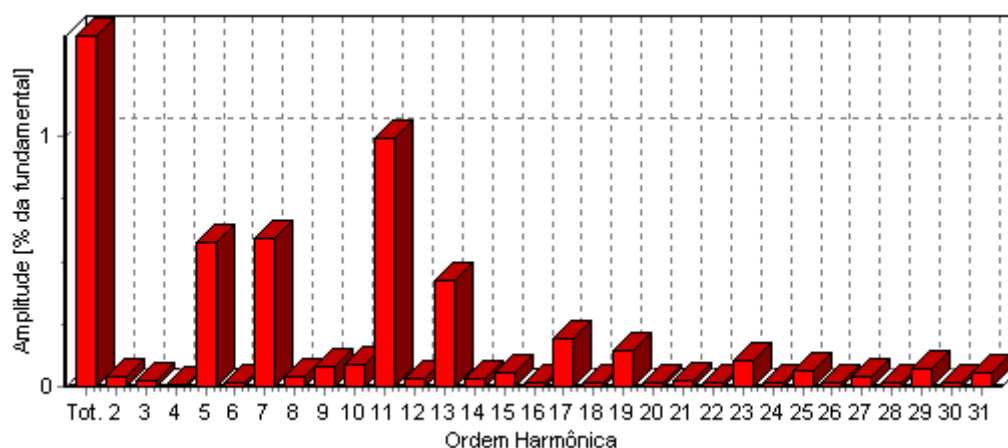


Figura 4.33- Espectro harmônico da tensão e DTT na barra de baixa tensão simulado com filtro híbrido.

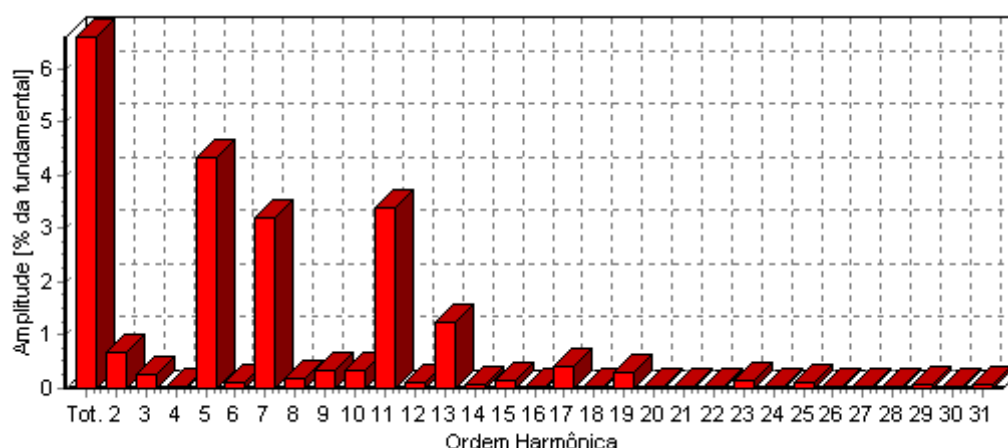


Figura 4.34- Espectro harmônico de corrente e DTI na barra de baixa tensão simulado com filtro híbrido.

Para este caso, a tabela 4.17 a seguir apresenta os resultados obtidos na simulação referentes à tensão, corrente e distorção na barra avaliada.

Tabela 4-17: Tensão, corrente e distorções na barra analisada

Tensão eficaz(V)	Corrente eficaz(A)	DTT(%)	DTI(%)
217,51	581,01	1,4	6,59

Portanto, comparando-se as tabelas 4.17 com a tabela 4.15 do caso 4, verifica-se que a corrente eficaz é menor, devido fornecimento de potência reativa pelo filtro dessintonizado inserido neste caso junto com o filtro ativo. Consequentemente a tensão eficaz aumentou devido à menor queda de tensão no transformador.

A tabela 4.18 apresenta os resultados relativos às potências e ao fator de potência simulado após a inserção do filtro híbrido no sistema. Como esperado, a potência reativa reduziu em relação ao caso base, no entanto ainda bem acima da potência reativa obtida com os filtros passivos. Por outro lado, a potência de distorção ficou abaixo da obtida com os filtros passivos. Já o fator de potência ficou abaixo do obtido com os filtros passivos, no entanto, com resultado acima do limite estabelecido e acima do fator de potência desejado inicialmente, ou seja, acima de 0,92.

Tabela 4-18: Fluxos de potências e fator de potência na barra analisada

Potências e fator de potência			
Total		Fundamental	
Ativa(kW)	208,93	Ativa(kW)	208,93
Reativa(kVAr)	63,38	Reativa(kVAr)	63,56
Aparente(kVA)	218,88	Aparente(kVA)	218,39
Distorção(kVAr)	15,55		
FP	0,955	FP	0,957

Finalmente, observaram-se resultados satisfatórios obtidos tanto no caso 5 como no caso 3, sendo neste instante necessário comparar os custos dos equipamentos para que o problema da empresa seja resolvido com o menor custo/benefício, conforme será considerado na sequência.

4.9 CUSTOS DOS BANCOS DE CAPACITORES E FILTROS HARMÔNICOS

Nesta seção serão apresentados os custos dos bancos de capacitores e filtros harmônicos que serão utilizados para efeito comparativo e outros custos que apesar de não serem utilizados nas simulações, proporcionarão uma visão mais ampla dos custos dos equipamentos mencionados neste trabalho.

Assim, a tabela 4.19 apresenta os custos de bancos de capacitores puros, para diversas potências nominais. Para a composição destes custos foi adotado células monofásicas do tipo PPM, montados em painel com todos os acessórios necessários para sua instalação e manobra. Todos estes bancos são automáticos divididos em três estágios, conforme informações do fabricante.

Tabela 4-19: Custos típicos de bancos de capacitores puros

POTÊNCIA NOMINAL(kVAr)	TENSÃO NOMINAL(V)	PREÇO(R\$)
30	220	18.612,00
45	220	19.482,00
60	220	20.378,00
75	220	22.041,00
90	220	22.193,00

Semelhantemente à tabela anterior, na tabela 4.20 a seguir apresentam-se os custos dos bancos dessintonizados. Estes são compostos por células do tipo

PPM em série com reatores de núcleo de ferro, montados em painel com todos os acessórios necessários para sua instalação e manobra. Todos estes bancos são automáticos divididos em três estágios, conforme informações do fabricante.

Tabela 4-20: Custos típicos de filtros dessintonizados

POTÊNCIA NOMINAL(kVAr)	TENSÃO NOMINAL(V)	PREÇO(R\$)
30	220	21.047,00
45	220	22.788,00
60	220	24.057,00
75	220	27.102,00
90	220	28.067,00

Como anteriormente, a tabela 4.21 apresenta os custos dos filtros passivos sintonizados. Estes são compostos por capacitores impregnados a óleo devido ao alto conteúdo harmônico de circulação no equipamento. Os capacitores, reatores e acessórios para instalação e manobra são montados em painel.

Tabela 4-21: Custos típicos de filtros dessintonizados

DESCRIÇÃO	TENSÃO NOMINAL(V)	PREÇO(R\$)
Filtro 5ª ordem 45kVAr	220	30.040,00
Filtro 7ª ordem 45kVAr	220	29.225,00
Filtro 11ª ordem 45kVAr	220	28.546,00

Finalmente, a tabela 4.22 apresenta os custos dos filtros ativos. Estes também são montados em painel prontos para instalação.

Tabela 4-22: Custos típicos de filtros harmônicos ativos

CORRENTE NOMINAL(A)	TENSÃO NOMINAL(V)	PREÇO(R\$)
25	220	32.750,00
50	220	36.340,00
100	220	63.540,00
150	220	83.560,00
200	220	125.980,00

4.10 COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DOS CASOS SIMULADOS

Esta seção visa apresentar a comparação de desempenho técnico e de custos dos equipamentos simulados anteriormente caso a caso. A comparação é baseada nos resultados das simulações obtidas neste capítulo.

Assim, a tabela 4.23 a seguir apresenta um quadro comparativo entre as características técnicas e os valores em pu dos casos simulados, tomando como base o valor do banco de capacitor puro (R\$22.193,00).

Tabela 4-23: Quadro comparativo dos casos simulados

Descrição	DTT(%)	DTI(%)	Tensão eficaz(V)	FP total	FP fund	Preço (pu)
Caso base – Sem equipamento	8,56	38,05	217,02	0,81	0,87	-
Caso 1 - Capacitor puro	29,72	110,56	227,07	0,616	0,963	1
Caso 2 - Filtro dessintonizado	7,13	35,32	218,94	0,932	0,991	1,26
Caso 3 – Filtro Sintonizado	2,63	17,42	219,56	-0,981	-0,996	3,96
Caso 4 – Filtro ativo	1,49	6,75	216,79	0,911	0,913	5,68
Caso 5 – Filtro híbrido	1,32	6,37	218,23	0,985	0,987	6,62

Como pode ser visto na tabela 4.23 o banco de capacitor puro é o equipamento de custo mais baixo comparado a outras opções. No entanto, os níveis de distorções harmônicas totais de tensão e corrente obtidas após sua inserção no sistema ficaram amplificadas em relação ao caso base devido à ocorrência de ressonância paralela, como foi mostrado no item 4.4, inviabilizando esta solução. Neste sentido, o DTT e o DTI apresentaram níveis acima do caso base, a tensão aumentou e o fator de potência total reduziu drasticamente. Apenas o fator de potência fundamental ficou acima dos limites aceitáveis, no entanto este não traria nenhum benefício para a empresa, pois o fator de potência exigido pelas concessionárias de energia é o total, que ficou bem abaixo dos valores desejados ($>0,92$). Portanto, conclui-se que não existe nenhum motivo para a instalação de capacitor puro neste caso.

Observa-se também que o filtro dessintonizado é o equipamento com segundo menor custo dentre os analisados, ficando aproximadamente cinco vezes mais econômico que o equipamento de maior custo. Apesar de ser tentadora a vantagem do filtro dessintonizado em relação ao custo, este causou apenas uma leve redução do DTT e DTI, como era esperado, pois este não tem a função básica de filtrar os harmônicos do sistema. O fator de potência simulado com a instalação deste equipamento ficou bem acima do caso base, apresentando limites aceitáveis. A tensão eficaz apresentou-se bem próxima da tensão nominal devido ao fornecimento de potência reativa do banco. Portanto, verifica-se que a instalação do filtro dessintonizado melhoraria em parte as características do sistema, no entanto não resolveria os problemas de forma completa. Portanto, conclui-se que a instalação deste equipamento isoladamente não seria a melhor solução para este caso.

O filtro passivo é o terceiro equipamento com maior custo, perdendo apenas para o filtro ativo e o filtro híbrido. No entanto, vale ressaltar que a solução com filtros passivos, apesar de possuir um custo superior às anteriores,

filtrou de forma eficiente o conteúdo harmônico presente, e proporcionaram que o índice DTT resultasse abaixo dos limites recomendados. O fator de potência obtido com os filtros passivos é o melhor dentre todos os outros equipamentos. O fator de potência total ficou 0,981 capacitivo, ou seja, bem maior que o objetivo inicial que era 0,95. O melhor nível de tensão também foi obtido neste caso (219,56V), enquadrando-se com valor praticamente igual ao nominal (220V). Portanto, os filtros passivos se mostraram como boa opção para atender tecnicamente os problemas presentes, tanto de distorção harmônica quanto do fator de potência.

O filtro ativo possui custo aproximadamente 1,5 vezes maior que os filtros passivos, se mostrando uma opção não muito vantajosa comercialmente neste caso. Os níveis de DTT e DTI do filtro ativo se comportaram melhores que os obtidos com os filtros passivos. Porém, devido à potência reativa limitada deste equipamento o fator de potência com a instalação deste ficaria ainda abaixo dos limites aceitáveis, apesar de conduzir a um aumento considerável, não sendo recomendado como solução. Portanto, verifica-se que economicamente o filtro ativo neste caso é menos viável que o filtro passivo e, além disso, tecnicamente deixou a desejar no critério do fator de potência.

Finalmente, para o filtro híbrido, a deficiência do filtro ativo isolado é compensada e o fator de potência resultou acima dos limites aceitáveis. Apesar do melhor fator de potência ter sido obtido com os filtros passivos, o filtro híbrido atende plenamente o objetivo inicial de elevar o fator de potência para 0,95. Os níveis de DTT e DTI foram os melhores dentre todos os casos simulados. Porém, apesar de ser a melhor solução técnica, a solução com filtro híbrido possui um custo maior que a solução com filtros passivos.

Portanto, baseando-se nos resultados das simulações obtidos, conclui-se que os filtros passivos se mostraram a solução mais viável do ponto de vista técnico-econômico, ou seja, possui o melhor custo/benefício.

4.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo foi dedicado ao estudo comparativo entre os equipamentos mitigadores de harmônicos e compensadores de energia reativa em foco neste trabalho. A comparação foi realizada com base em simulações da inserção destes equipamentos no sistema de empresa de telefonia real objetivando corrigir o fator de potência e reduzir os níveis harmônicos.

Inicialmente foram apresentados os dados técnicos da empresa e os resultados das medições realizadas com o intuito de especificar o conteúdo harmônico presente no sistema da empresa. Notou-se uma forte presença de componentes harmônicas de 5^a, 7^a e 11^a ordens e um DTT acima dos limites recomendados. Estes dados dão uma orientação para projetistas que se depararem com empresas similares, subsidiando bases para projeto de instalação de filtros harmônicos.

Diante disto, buscou-se obter resultados satisfatórios para DTT e para o fator de potência com a inserção de equipamentos. Dentro deste contexto foi simulada a inserção de alguns equipamentos, os diversos estudos realizados evidenciaram que:

- A inserção de bancos de capacitores puros nos sistemas deve ser analisada com bastante cuidado, pois assim como neste caso em estudo, o banco pode ressonar com o sistema causando elevação dos níveis de distorção harmônica e reduzindo ainda mais o fator de potência, ao invés de elevá-lo.
- A instalação de filtro dessintonizado não se mostra muito eficiente em instalações com alto nível de distorção harmônica, pois além do filtro dessintonizado não reduzir os níveis de distorção, a elevação

do fator de potência fica limitada, visto que o fator de potência tem uma relação direta com os níveis de distorção.

- A instalação de filtros sintonizados foi uma boa solução neste caso, pois além de filtrarem os principais harmônicos presentes, os filtros sintonizados na frequência fundamental forneceram a energia reativa para o sistema necessária para elevar o fator de potência para níveis aceitáveis.
- A solução com filtro ativo apresentou resultados satisfatórios quanto aos níveis de distorção harmônica, porém não solucionaram o problema do baixo fator de potência da empresa. Isto evidencia que a sua utilização isolada é mais adequada para sistemas que não necessitem de compensação reativa.
- O filtro híbrido, assim como os filtros passivos, elevou o fator de potência para níveis aceitáveis e reduziu a distorção harmônica de acordo com os níveis recomendados.

Finalmente, do ponto de vista econômico constatou-se que dentre os equipamentos em estudo, os filtros passivos possuem os menores custos. Somado aos bons resultados obtidos tecnicamente, conclui-se que estes são os equipamentos com melhor custo/benefício.

O próximo passo deste trabalho envolve a instalação do equipamento em campo e confirmação dos resultados obtidos na simulação. Assim, no próximo capítulo são mostrados os resultados obtidos após a instalação física dos equipamentos filtros harmônicos passivos em campo e confirmação dos resultados obtidos na simulação.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHOS DOS FILTROS PASSIVOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O capítulo anterior apresentou as simulações computacionais com análise comparativa das características técnicas e dos custos dos equipamentos propostos em cada caso. Neste capítulo, é apresentado o desempenho operacional do filtro harmônico passivo sintonizado, considerado como o equipamento mais viável no capítulo anterior. Neste estudo experimental, será analisado principalmente o desempenho do equipamento nas características do sistema elétrico considerado.

5.2 RESULTADOS

Nesta seção, o desempenho operacional dos três filtros harmônicos passivos sintonizados é apresentado. As medições foram aferidas com medidor da marca CIRCUITOR, modelo AR-5 durante duas horas com intervalo de integração de 60 segundos. O período de medição realizada foi

aproximadamente das 08h30min às 10h30min. Os três equipamentos foram inseridos ao mesmo tempo, as 09h40min. Com a utilização de um programa estatístico de tratamento de dados de medição foi possível apresentar estes dados na forma de gráficos e tabelas conforme serão mostrados a seguir.

Inicialmente, a figura 5.1 a seguir apresenta o perfil da tensão fase-fase. Em função da compensação reativa na frequência fundamental, verifica-se um aumento médio de tensão de aproximadamente 2,6 volts no instante em que os filtros foram energizados.

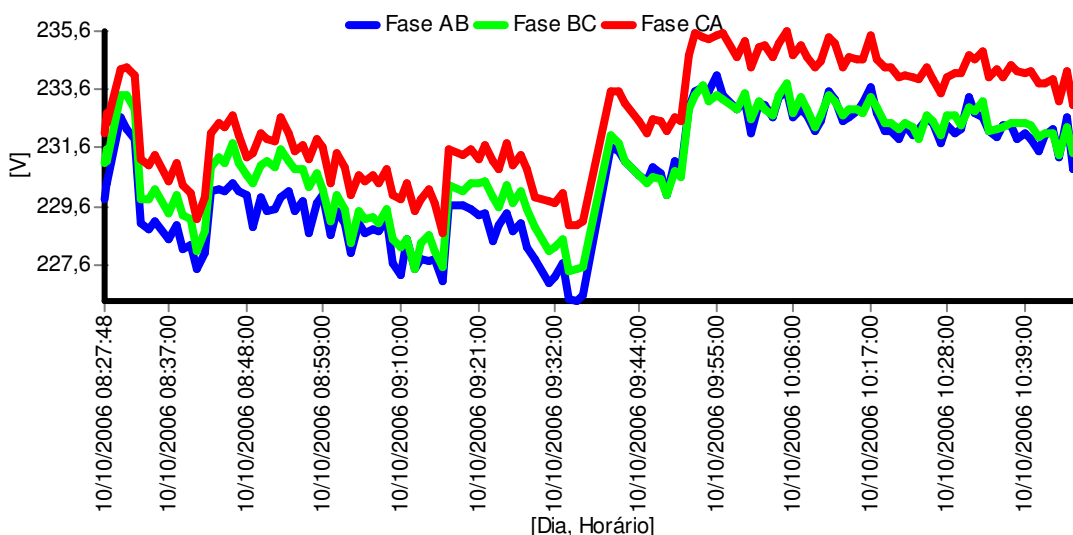


Figura 5.1- Comportamento da tensão fase-fase eficaz.

Os valores estatísticos da tensão fase-fase antes e após instalação dos filtros estão apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5-1: Valores estatísticos da tensão fase-fase antes da instalação dos filtros

Estatística: Tensão eficaz – Fase-Fase				
[V]	Mín	Méd	Máx	P95
AB	226,37	228,96	232,65	230,44
BC	227,40	229,85	233,44	231,70
CA	228,68	231,09	234,36	232,80

Tabela 5-2: Valores estatísticos da tensão fase-fase após instalação dos filtros

Estatística: Tensão eficaz – Fase-Fase				
[V]	Mín	Méd	Máx	P95
AB	230,01	232,34	234,09	233,57
BC	230,00	232,43	233,81	233,44
CA	232,10	234,26	235,61	235,47

Adicionalmente, em função dos efeitos da compensação reativa na frequência fundamental, observa-se uma redução na corrente na figura 5.2, em média de aproximadamente 673A para 606A.

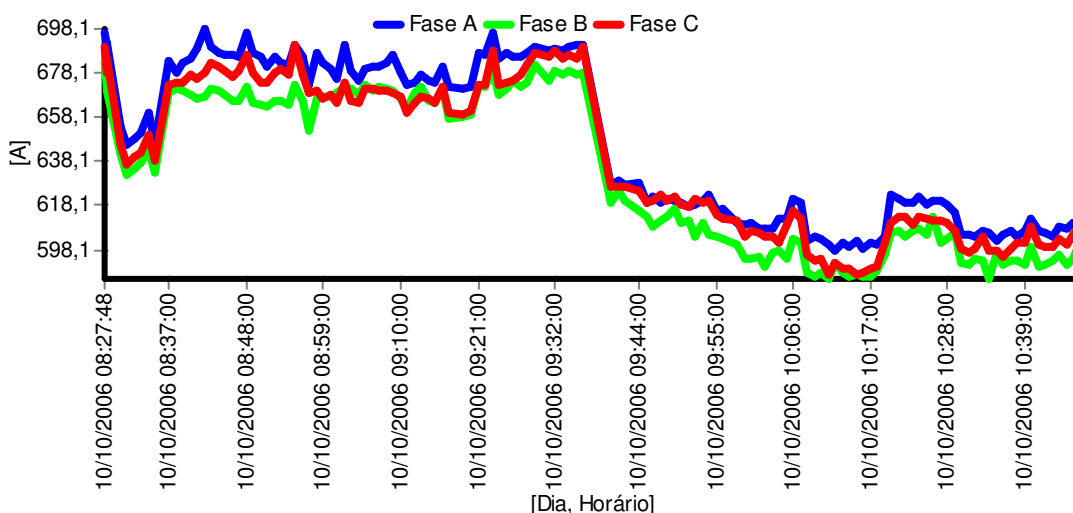


Figura 5.2- Comportamento da corrente total eficaz.

A figura 5.3 apresenta o perfil da potência ativa trifásica. Como verificado nas simulações, a potência ativa não sofreu significativas alterações após a instalação dos filtros.

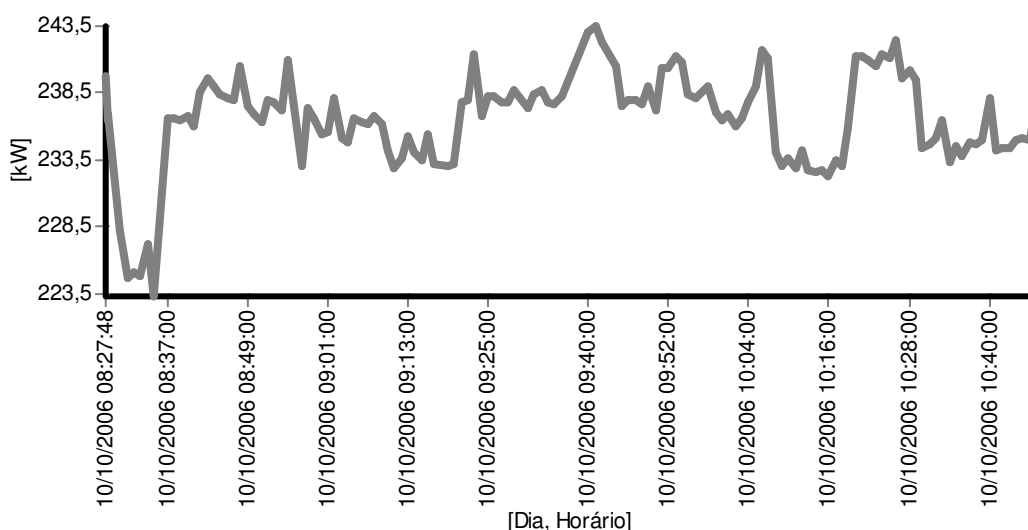


Figura 5.3- Comportamento da potência ativa total.

O perfil da potência reativa trifásica está apresentado na figura 5.4. Esta potência reduziu em média de aproximadamente 100kvar para -35kvar, ou seja, decresceu de 135kvar que é a potência total somada dos três filtros instalados. Por meio desta figura, pode-se confirmar a eficácia dos filtros harmônicos referente à compensação reativa na frequência fundamental (60Hz).

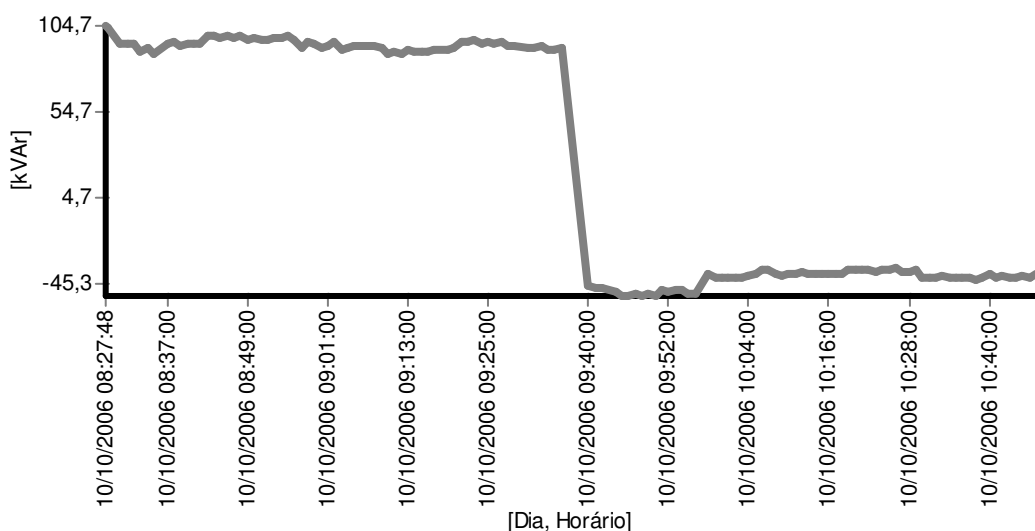


Figura 5.4- Comportamento da potência reativa total.

O perfil da potência de distorção trifásica está apresentado na figura 5.5. A potência de distorção reduziu de 85kVAr para 40kVAr. Após a inserção dos filtros, a potência de distorção ficou bem próxima do valor simulado no item 4.6.2 do capítulo 4.

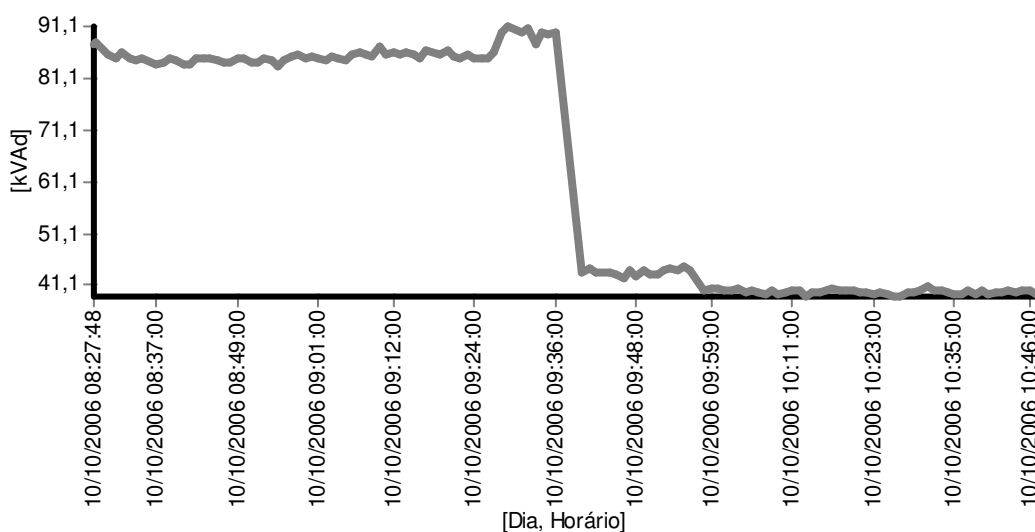


Figura 5.5- Comportamento da potência de distorção total.

O perfil da potência aparente trifásica está apresentado na figura 5.6. Percebe-se a redução da mesma no instante de inserção dos filtros, em média de 268kVA para 245kVA.

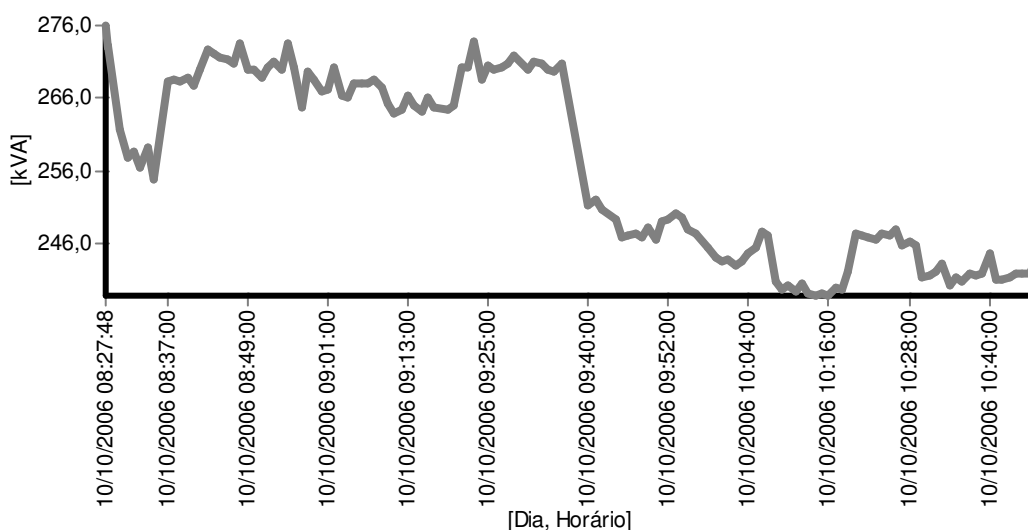


Figura 5.6- Comportamento da potência aparente total.

Os valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S antes e após a instalação dos filtros estão apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5-3: Valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S antes da instalação dos filtros

Estatística de potências total trifásica				
[kW]	Mín	Méd	Máx	P95
P	223,32	235,90	241,40	239,75
Q	88,72	94,25	104,72	99,14
D	83,33	85,78	91,12	89,98
S	254,34	268,12	278,47	274,60

Tabela 5-4: Valores mínimos, médios, máximos e P95 de P, Q, D e S após instalação dos filtros

Estatística de potências total trifásica				
[kW]	Mín	Méd	Máx	P95
P	232,37	237,27	243,54	242,21
Q	-52,07	-42,18	-35,32	-37,12
D	38,96	40,78	44,78	44,08
S	238,97	244,46	252,13	250,09

O fator de potência total da instalação antes e após a energização dos filtros está apresentado na figura 5.7. Os resultados mostram que:

- **Antes:** o fator de potência era de 0,88. Apesar do fator de potência estar maior que o fator de potência medido anteriormente (figura 4.2), continua abaixo dos limites aceitáveis;
- **Após:** como esperado pela simulação, o fator de potência ficou capacitivo, com valor de -0,97, ou seja, maior que os limites aceitáveis;

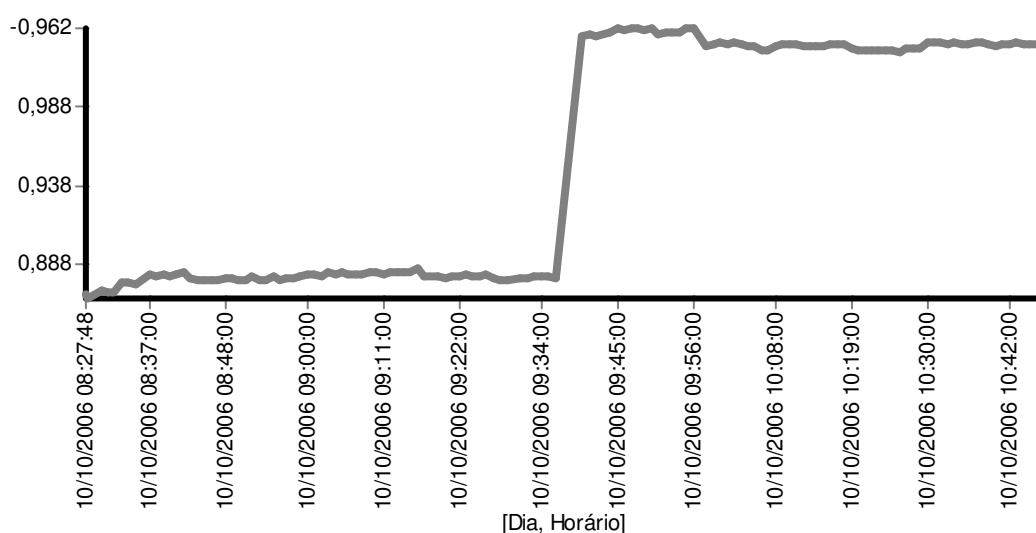


Figura 5.7- Comportamento do fator de potência total.

A figura 5.8 apresenta o perfil do fator de potência fundamental antes e após a energização dos filtros.

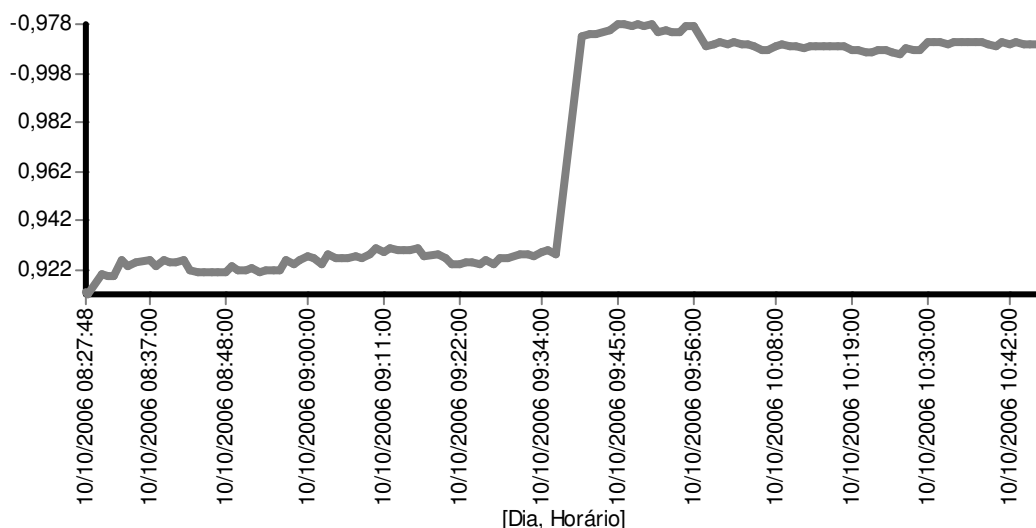


Figura 5.8- Comportamento do fator de potência para fundamental.

O perfil da distorção harmônica total de tensão está apresentado na figura 5.9. Os resultados mostram que:

- **Antes:** a distorção harmônica total de tensão em média estava em torno de 7,83% para a fase AB, 7,1% para a fase BC e de 7,49% para a fase CA;
- **Após:** a distorção ficou em torno de 3,95 para a fase AB, 4,7% para a fase BC e de 3,51% para a fase CA, ou seja, valores inferiores a 5% (dentro do limites recomendados pela IEEE-519/1992);

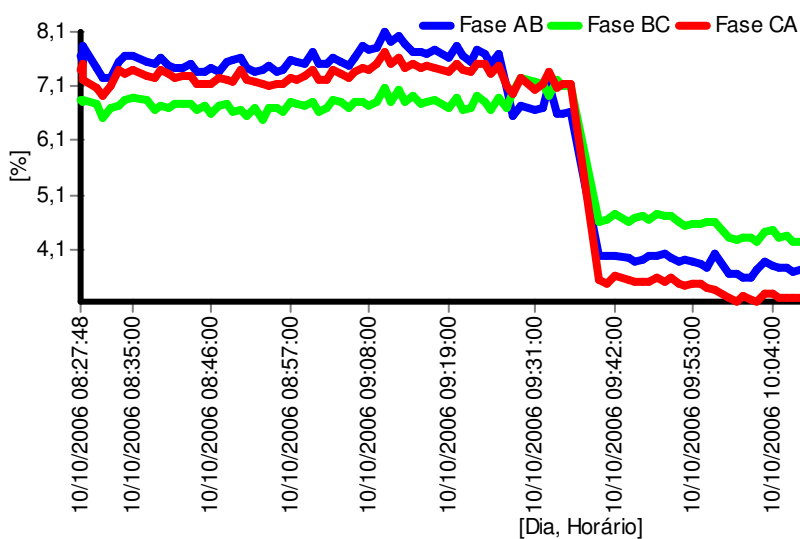


Figura 5.9- Comportamento da distorção harmônica total de tensão fase-fase.

A figura 5.10 apresenta o perfil da distorção harmônica total de corrente antes e após a energização dos filtros. Os resultados mostram que:

- **Antes:** a distorção nas três fases estava em torno de 28%;
- **Após:** a distorção ficou em torno de 15%. Este valor está bem coerente com o valor obtido nas simulações, 17,42%.

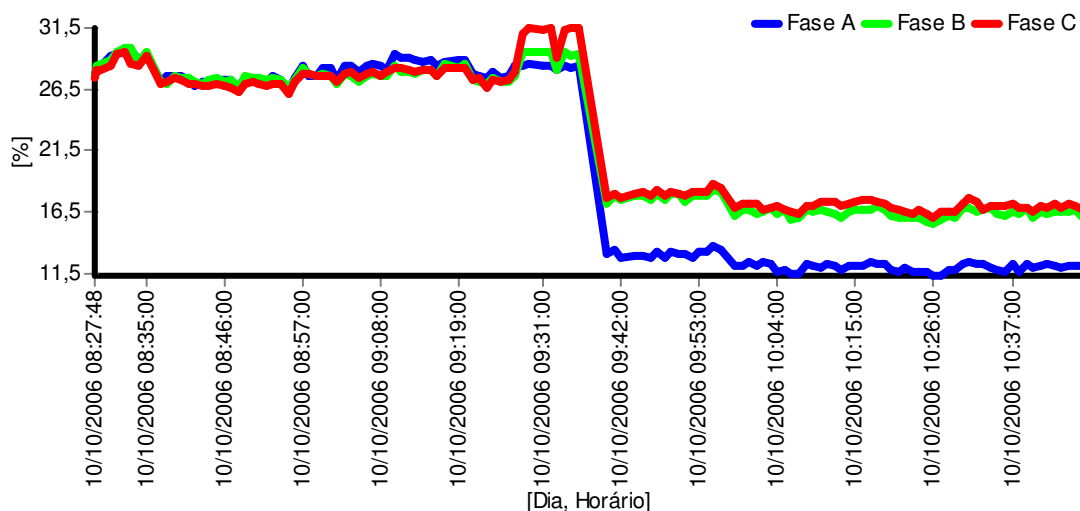


Figura 5.10- Comportamento da distorção harmônica total de corrente.

A fim de obter os espectros harmônicos de corrente e tensão após a energização dos filtros, foi feito um tratamento estatístico apenas do período em que os filtros estiveram presentes no sistema, ou seja, a partir das 09h40min.

As figuras 5.11, 5.12 e 5.13 ilustram os espectros harmônicos médios, de probabilidade P95 e máximos da tensão, respectivamente, obtidos do tratamento estatístico mencionado. De acordo com estas figuras, os limites de distorção individual de tensão nas ordens de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a, ficaram todas abaixo dos níveis recomendados. A distorção harmônica total de tensão, como mencionado anteriormente, também está abaixo dos limites recomendados.

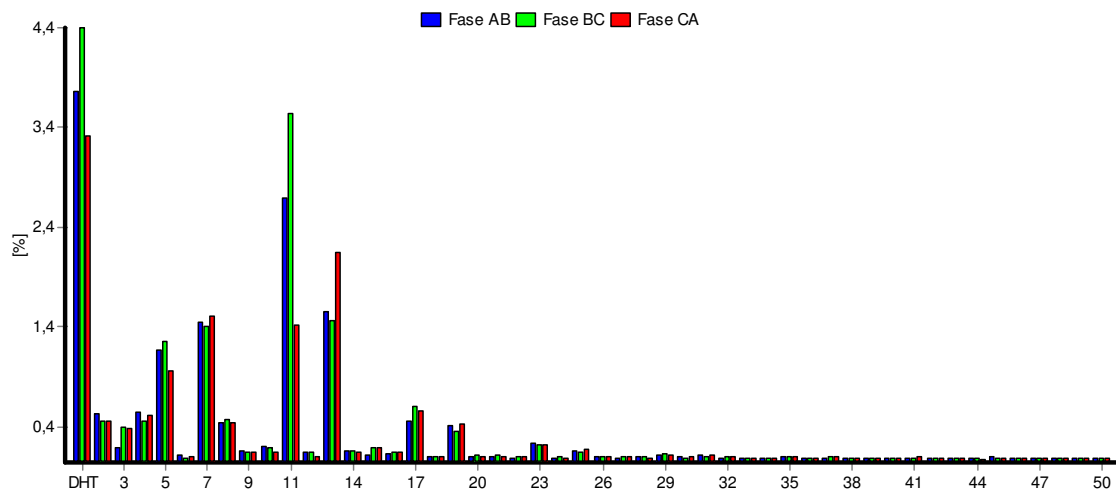


Figura 5.11- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.

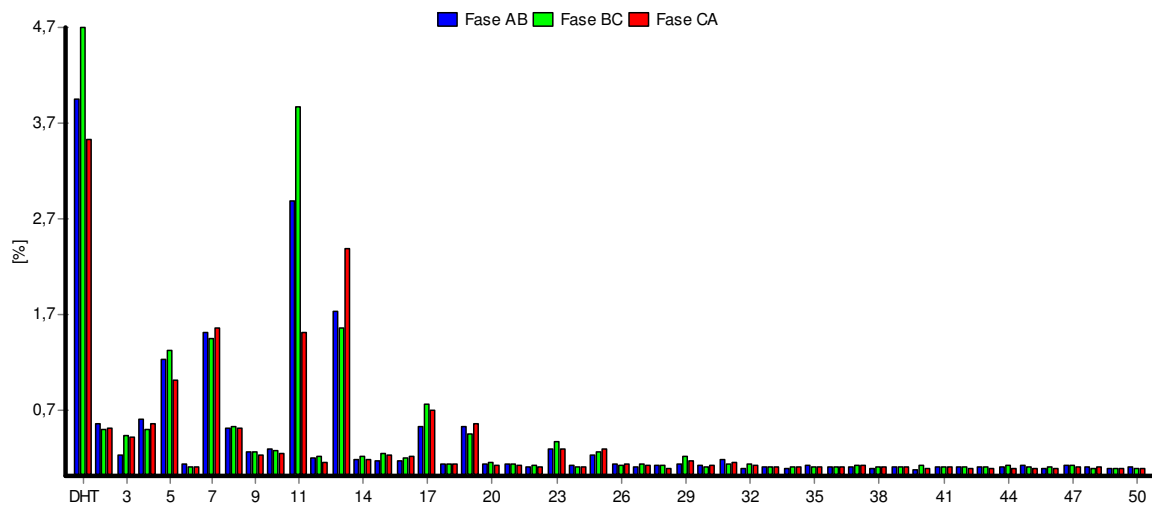


Figura 5.12- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade P95 percentuais.

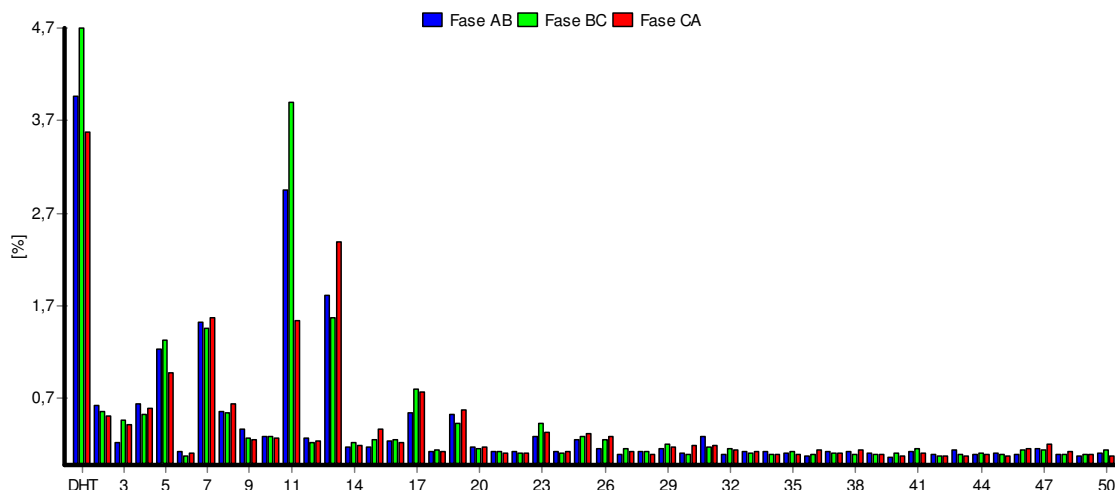


Figura 5.13- Espectro harmônico típico de tensão obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.

As figuras 5.14, 5.15 e 5.16 ilustram os espectros harmônicos médios, de probabilidade P95 e máximos da corrente, respectivamente.

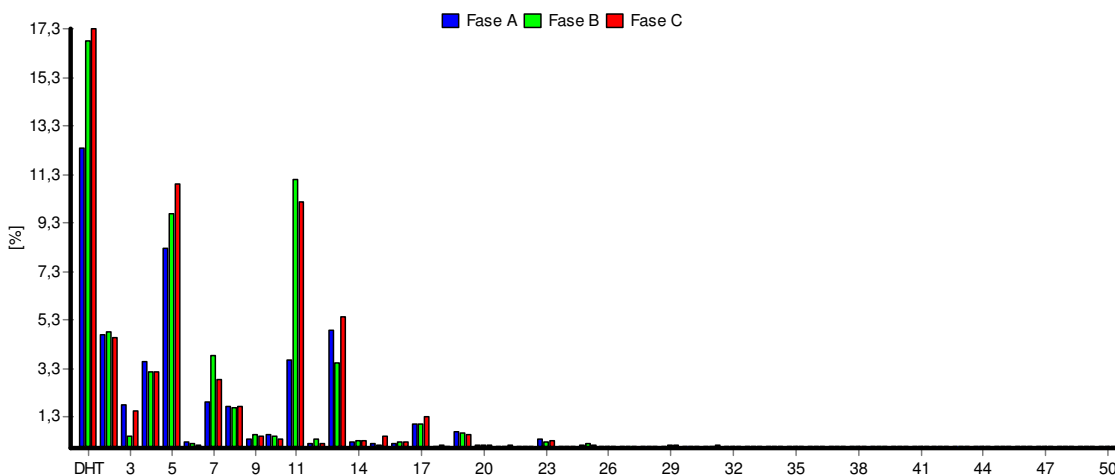


Figura 5.14- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores médios percentuais.

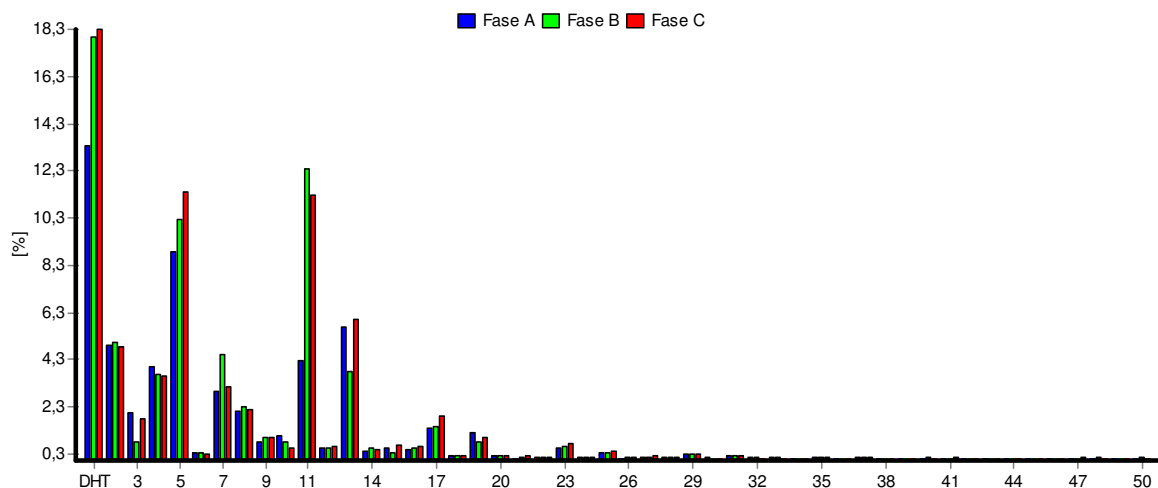


Figura 5.15- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores probabilidade P95 percentuais.

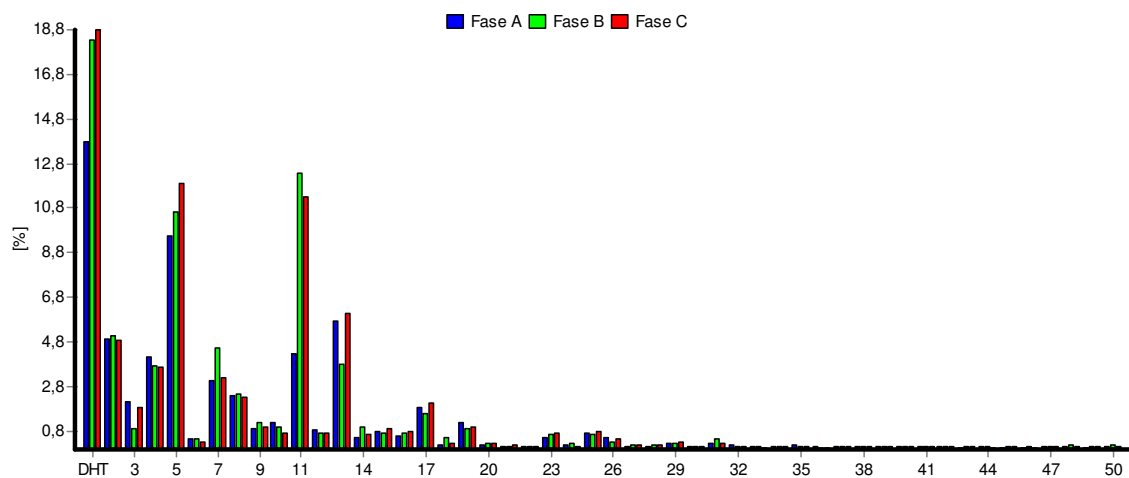


Figura 5.16- Espectro harmônico típico de corrente obtido a partir das medições executadas – valores máximos percentuais.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a instalação dos filtros harmônicos passivos sintonizados, houve uma notável melhora nos níveis da qualidade da energia elétrica na instalação da empresa de telefonia.

A aplicação dos filtros harmônicos passivos sintonizados apresentou grandes benefícios técnicos nos seguintes aspectos:

- Redução da distorção harmônica total de tensão;
- Redução da distorção harmônica total de corrente;
- Elevação da tensão eficaz;
- Redução do carregamento do transformador;
- Aumento do fator de potência.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante as considerações e comentários feitos ao término de cada capítulo considera-se essencial neste momento, destacar as principais constatações obtidas dos estudos realizados ao longo desta dissertação.

O Capítulo I foi direcionado a uma contextualização do tema central desta pesquisa, com destaque a apresentação de uma síntese dos principais documentos bibliográficos encontrados, e ainda, a identificação das áreas ainda merecedoras de atenção sobre a questão dos equipamentos mitigadores de harmônicos e compensadores de energia reativa. Uma vez realizadas tais tarefas, foi também estabelecido o planejamento do projeto que culminou na presente dissertação.

Objetivando oferecer uma contribuição didática à formação do leitor e sobre o estado da arte dos fenômenos associados às harmônicas em sistemas de energia, o Capítulo II destacou os conceitos, causas, efeitos, normas e soluções relacionados aos harmônicos presentes nos sistemas elétricos de potência. Uma vez estabelecidos os fundamentos que regem os harmônicos, foram tecidos comentários gerais voltados para o emprego de soluções para atenuação de harmônicos e compensação de reativos. Dentro deste contexto, foram ainda

contemplados os fundamentos básicos que norteiam os filtros passivos e ativos, assuntos principais deste trabalho.

No capítulo 3, foram apresentadas as definições, características e funções dos seguintes equipamentos: capacitores, filtro harmônico sintonizado, filtro harmônico dessintonizado, filtro harmônico ativo e filtro harmônico híbrido. Técnicas de projeto dos filtros sintonizados foram apresentadas e comentadas. Estas técnicas de projeto, por sua vez, tiveram seu desenvolvimento e sua aplicação baseadas no processo de cálculo descrito no Capítulo 4, relativo às técnicas para realização dos estudos de penetração harmônica.

Foram abordados os filtros ativos de potência e, do ponto de vista deste trabalho, suas principais classificações, características, configurações e possíveis distúrbios compensados por estes.

Sendo assim, duas categorias se destacam na classificação dos FAP's, a categoria que leva em conta a natureza do barramento CC, a que se refere a configuração dos FAP, podendo ser utilizada a configuração paralela, série ou híbrida. A configuração paralela caracteriza-se pela conexão do conversor estático em paralelo com o sistema e realização de compensação que atua como se fosse uma fonte de corrente CA controlada. A configuração série se caracteriza pela conexão do conversor estático em série com o sistema, através de um transformador de acoplamento e realização de compensação que atua como se fosse uma fonte de tensão CA controlada.

Em seguida foram abordados os filtros híbridos, ou seja, associação de filtros passivos e ativos, podendo esta associação ser em série, paralelo ou série-paralelo. Com isto pode-se obter melhor desempenho, quando comparado a um filtro passivo ou ativo puro.

Na configuração do filtro híbrido série, o filtro ativo atua como um isolador harmônico entre a rede elétrica e o filtro passivo, permitindo assim eliminar a ressonância harmônica no sistema elétrico. Já na configuração

paralela o filtro ativo opera injetando correntes em fase oposta a da carga não-linear, cancelando as harmônicas de forma parcial ou em sua totalidade. O filtro passivo em paralelo, além de realizar a compensação harmônica e de reativos fundamentais, pode amortecer a ressonância harmônica em um sistema elétrico. As principais funções de um filtro híbrido paralelo são: atenuação de harmônicos, compensação de reativo, compensador de desequilíbrio e redução de flicker na tensão.

Outro tipo de configuração dos filtros híbridos é a série-paralela, onde possuem capacidade de reduzir harmônicos de tensão e corrente. Estes filtros podem ser empregados para a regulação de tensão e compensação de fator de potência e atenuação de harmônicos de corrente.

O cerne do Capítulo IV teve como enfoque principal a análise comparativa e o estudo de casos, todos simulados em um programa computacional existente. Para tanto, primeiramente detalhou-se o sistema elétrico considerado nas simulações, que foi uma empresa de telefonia. Neste estudo, foram feitas análises comparativas de desempenho entre os filtros focos deste trabalho já mencionados anteriormente. Neste sentido, levando-se em consideração as simulações apresentadas, bem como as observações de cada caso simulado, chegou-se à conclusão de que, para as condições analisadas, a melhor opção para redução das distorções harmônicas seria do ponto de vista técnico-econômico os filtros passivos.

Muito embora os resultados gerais tenham sido esclarecedores sobre a operação do sistema elétrico envolvendo rede de suprimento, carga e equipamentos mitigadores de harmônicos e compensadores de energia reativa, ressalta-se que o otimismo dos desempenhos obtidos não podem ser prontamente estendidos a outras situações. De fato, é importante ressaltar que cada sistema exigirá estudos próprios para verificação das situações operacionais impostas e, uma vez constatados fenômenos prejudiciais, estes

deverão merecer avaliações complementares, após a implementação de possíveis soluções clássica empregadas na engenharia elétrica.

Apesar de uma série de comentários conclusivos já terem sido realizados nas considerações finais de cada capítulo, uma abordagem global enfocando as principais contribuições efetuadas por este trabalho se faz necessária. Desta forma, as principais contribuições técnicas e didáticas desta dissertação serão resumidas a seguir:

- Apresenta uma metodologia de estudo e análise técnica-comercial na busca de soluções para diminuir harmônicos e compensar energia reativa. Tal metodologia, atribuída a um estudo de caso, mostrou que nem sempre o equipamento mais barato é o melhor tecnicamente sendo, portanto, necessário estudo comparativo para determinação da melhor solução. Além disso, através da realização de simulações computacionais envolvendo análises comparativas de desempenho dos equipamentos em estudo, puderam ser evidenciadas e elucidadas as vantagens e desvantagens relativas da aplicação de cada um destes equipamentos.
- Relatos das harmônicas típicas presentes em uma empresa do segmento de telefonia, assim como, o percentual de distorção harmônico total de tensão e corrente.

Através de medições práticas realizadas na empresa de telefonia apresentadas em um estudo de caso é possível se ter informações dos percentuais de harmônicos presentes em empresa do mesmo segmento. Estes dados dão uma orientação para projetistas que se depararem com empresas similares, subsidiando bases para projeto de instalação de filtros harmônicos;

- Consequências sem a devida observância do emprego de banco de capacitores puro em sistemas com alto conteúdo harmônico devido à ocorrência de ressonância. Estes equipamentos ao invés de elevar o fator de potência, podem causar o contrário e reduzi-lo;
- Determinação de procedimentos sistemáticos que conduzem ao projeto de banco de capacitores e filtros harmônicos, a partir de medições e estudos de penetração harmônica dos sistemas. Tais procedimentos foram desenvolvidos de forma que os projetos possam ser realizados com melhor aproveitamento da potência reativa dos bancos de capacitores adotados e a custos mais baixos;
- Aplicação de banco de capacitores, filtro harmônico passivo dessintonizado, filtro harmônico passivo sintonizado, filtro harmônico ativo e filtro harmônico híbrido, na redução de harmônicos indesejáveis no sistema analisado;
- A instalação de filtro dessintonizado não se mostra muito eficiente em instalações com alto nível de distorção harmônica, pois além do filtro dessintonizado não reduzir os níveis de distorção, a elevação do fator de potência fica limitada, visto que o fator de potência tem uma relação direta com os níveis de distorção.
- A instalação de filtros sintonizados é uma boa solução em instalações com alto nível de DTT e baixo fator de potência, pois além de filtrarem os principais harmônicos presentes, os filtros sintonizados na frequência fundamental forneceram a energia reativa para o sistema necessária para elevar o fator de potência para níveis aceitáveis. Além disso, mesmo em caso onde se necessita instalar mais que um equipamento, a solução final pode ser ainda mais econômica que a solução utilizando os filtros ativos ou híbridos.

- A solução com filtro ativo apresenta resultados satisfatórios quanto aos níveis de distorção harmônica, porém podem não solucionar o problema do baixo fator de potência da empresa devido ao seu fornecimento de reativos limitado. Isto evidencia que a sua utilização isolada é mais adequada para sistemas que não necessitem de compensação reativa, mas sim de atenuação de harmônicos.
- O filtro híbrido, assim como os filtros passivos, tem a capacidade de elevar o fator de potência e reduzir a distorção harmônica. No entanto, esta solução tende a possuir um custo maior devido à utilização além do filtro ativo, também do filtro passivo.
- Verificação que atualmente, soluções de redução de harmônicos utilizando filtros ativos ou mesmo filtros híbridos podem possuir custos bem próximos aos dos filtros passivos;
- Demonstração da eficiência dos filtros harmônicos passivos em derivação na mitigação das distorções harmônicas de tensão e corrente.

Outro ponto a ser considerado está centrado nas questões merecedoras de futuros desenvolvimentos. Neste particular, após este período de dedicação ao tema focado nesta dissertação sugere-se que sejam realizados trabalhos adicionais com vistas a:

- Investigações adicionais empregando para tanto outros tipos de filtros harmônicos, assim como outros tipos de sistemas, visando obter uma visão prática dos equipamentos com melhores custo/benefícios.

- Estudo e desenvolvimento de técnicas de projeto para os tipos de filtros harmônicos buscando obter custos cada vez mais reduzidos e mais próximos aos dos bancos de capacitores puros.
- Investigações práticas da eficiência dos filtros harmônicos ativos e híbridos na mitigação das distorções harmônicas nas formas de onda das grandezas elétricas do sistema.
- Investigação sobre distribuição otimizada do banco de capacitores na composição de filtro sintonizado.
- Possibilidade de indução de arranjos magnéticos para bloqueio e filtragem de sequência zero, quando se caracterizar a presença da mesma no conteúdo harmônico medido.
- Caso a situação anterior seja investigada, realizar simulação trifásica ou multisequenciais para avaliação do desempenho da filtragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F., SANTOSO, S., BEATY, H. W., **Electrical Power Systems Quality**. Editora Mc-Graw Hill, EUA, 2004.
- [2] - IEEE Standard 519-1992, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 12 de Abril de 1993.
- [3] - Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, 30 de Agosto de 2006.
- [4] - Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Nº 414**, 9 de Setembro de 2010.
- [5] - RESENDE, J. W., **Harmônios em Sistemas Elétricos**. Apostila da disciplina Qualidade da Energia I: Análises e Soluções. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, 2008.
- [6] - NASCIMENTO, R. P., **Propostas de Procedimentos para Projetar Filtros Harmônicos a partir de um Programa de Penetração Harmônica, Incluindo Cálculos de Desempenho e de Suportabilidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Maio 2007.
- [7] - CAMARGO, R. F., **Contribuição ao Estudo de Filtros Ativos de Potência**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.
- [8] - SUTANO, D., BOTAM, K. S., CHANG, C. S., **Passive and Active Harmonic Filters for Industrial Power Systems**. TENCON IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems, Vol. I, p. 222-226, August 2002.

- [9] - CHEN, S., JOOS, G., **Analysis and Comparison of Passive&Active Harmonic Suppression Filters in Distribution Systems.** 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. II, p. 615-619, August 2002.
- [10] - IZHAR, M., HADZER C. M., SYAGRUDIN, M., TAIB, S., IDRIS, S., **Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in the Distribution System.** PECon 2004, Proceedings. National Power and Energy Conference, p. 104-108, Malaysia, July 2005.
- [11] - PETERSON, M., SINGH, B. N., RASTGOUFARD, P., **Active and Passive Filtering for Harmonic Compensation.** 40th Southeastern Symposium on System Theory, p. 188-192, New Orleans, April 2008.
- [12] - YONGHAI XU, XIANGNING XIAO, HAO LIU, HONG WANG, **Parallel Operation of Hybrid Active Power Filter with Passive Power Filter or Capacitors.** Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, p. 1-6, Beijing, December 2005.
- [13] - D'ÁVILA FILHO, R. C., BRAGA, M. F., SILVA, S. M., **Aplicação de Filtros Ativos e Passivos de Potência: Estudo de Caso.** VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, August 2008.
- [14] - GOTHELF, N., LEWALD, A., **Harmonic Filters for Industrial Applications. Technology Procurement Report from the Swedish National Energy Administration.** CIRED. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Vol. II, 6 pp., Amsterdam, August 2002.
- [15] - CHEN, Z., BLAABJERG, F., PEDERSEN, J. K., **A Study of Parallel Operations of Active and Passive Filters.** IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. II, p. 1021-1026, Denmark, November 2002.
- [16] - AKAGI, H., SRIANTHUMRONG, S., TAMAI, Y., **Comparisons in Circuit Configuration and Filtering Performance Between Hybrid and Pure Shunt Active Filters.** 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications, Vol. II, p. 12-16, January 2004.

- [17] - NAVA-SEGURA, A., JOSE-IGLESIAS, R. S., BANUELOS-SANCHEZ, P., NUNEZ-PEREZ, J., **Experimental Performance of Passive and Hybrid Filters Applied to AC/DC Converters fed by a Weak AC System.** Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. II, p. 600-605, Guimaraes, July 1997.
- [18] - PENG, F. Z., **Harmonic Sources and Filtering Approaches.** IEEE Industry Applications Magazine, p. 18-25, July/August 2001.
- [19] - NASSIF, A. B., WILSON XU, FREITAS, W., **An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications.** IEEE Transactions Power Delivery, p. 1710-1718, July 2009.
- [20] - DAS, J. C., **Passive Filters-Potentialities and Limitations.** Conference Record of the 2003 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, p. 187-197, June 2003.
- [21] - NASCIMENTO, R. P., RESENDE, J. W., **Análise Comparativa de Desempenho e de Suportabilidade entre Filtros Harmônicos Sintonizados e Amortecidos.** In: VII Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE), Anais, paper 151, Santos-SP, 2007.
- [22] - ARCON, A. B., PENTEADO, Jr. A. A., **Análise Técnico-econômica do Projeto de Filtros de Harmônicas Passivos para Sistemas Industriais – Estudo de Caso.** In: VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE), Anais, paper 21, Belém-PA, 2005.
- [23] - DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F., **Electrical Power Systems Quality.** Editora Mc-Graw Hill, EUA, 2002.
- [24] - OLIVEIRA, J. C., DELAIBA, A. C., **Qualidade da Energia Elétrica.** VCP/Jacareí-SP, Abril 2002.
- [25] - GARCIA, F. R., NAVES, A. C., **Harmônios em Sistemas Elétricos de Potência.** Maio de 2008.

- [26] - ROCCIA, P., QUILLON, N., **Harmônios em Redes Industriais: Causas, Efeitos e Soluções**. Revista Eletricidade Moderna, p. 124-154, Outubro de 1997.
- [27] - RODRIGUES, J. E., **Interferências de harmônicas em equipamentos de medição de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- [28] - SAMESIMA, M. I., **Cargas elétricas residenciais e comerciais não convencionais**. Apostila da disciplina Cargas elétricas residenciais e comerciais não convencionais. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, 2006.
- [29] - IEC 61000-3-6 ed2.0, **Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems**. 22 de Fevereiro de 2008.
- [30] - IEC 61000-2-2 ed2.0, **Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems**. 28 de Março de 2002.
- [31] - GODOI, A. A., **Alocação de bancos de capacitores em redes primária e secundária de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Fevereiro de 2009.
- [32] - NASCIMENTO, R. P., **Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Maio de 2007.
- [33] - MACEDO JR., J. R., **Desenvolvimento e aplicação de filtros harmônicos passivos em circuitos secundários de distribuição**. XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, Novembro de 2000.
- [34] - BONNER, J. A., ROCAMORA, R. G., **Aspectos a serem considerados no dimensionamento de filtros de harmônicos**. Revista Eletricidade Moderna, p. 52-60, Dezembro de 1995.

- [35] - ALVES, M. F., **Critérios para especificação e projeto de filtros de harmônicas.** Revista Eletricidade Moderna, p. 30-40, Julho de 1994.
- [36] - CAMARGO, R. F., **Contribuição ao estudo de filtros ativos de potência.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2002.
- [37] - AKAGI, H., **Active Harmonic Filters.** Proceeding of the IEEE 93.12, p. 2128-2141, December 2005.
- [38] - KALASCHNIKOW, S., HANSEN, S., ASIMINOAEI, L., MOOS, H. G., **Compensação ativa de harmônicos em aplicações industriais.** Revista Eletricidade Moderna, p. 50-58, Setembro de 2009.
- [39] - PEREIRA, M., SADEK, K., **Aplicação de filtros ativos de potência para atenuação de harmônicos.** Revista Eletricidade Moderna, p. 76-84, Abril de 1996.
- [40] - PENG, F. Z., **Harmonic Sources and Filtering Approaches.** IEEE Industry Applications Magazine, p. 18-25, July/August 2001.
- [41] - ABNT NBR IEC 60831-1, **Capacitores de potência auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão máxima de 1000V – Parte 1: Generalidades – Desempenho, ensaios e classificação – Requisitos de segurança – Guia para instalação e operação.** 13 e Março de 2009.
- [42] - ANTUNES, H. M. A., **Análise comparativa entre filtros híbridos aplicados a cicloconvertidores em uma siderúrgica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, Julho de 2009.
- [43] - PERETA, H. A., LANDIM, J. P., NOGUEIRA, L. R., **Filtro de dessintonia para banco de capacitores.** XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2007.
- [44] - GARCIA, F. R., **Arquivo industrial IESA.**