



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

INSTALAÇÃO DE CAPACITORES DE POTÊNCIA EM
REDES POLUÍDAS POR HARMÔNICOS E COM BAIXA
POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO

ROBERTA DANTAS RIBEIRO NAKAMURA

Belo Horizonte, 27 de maio de 2011

Roberta Dantas Ribeiro Nakamura

INSTALAÇÃO DE CAPACITORES DE POTÊNCIA EM REDES POLUÍDAS POR HARMÔNICOS E COM BAIXA POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia

Orientador: Selênio Rocha Silva

PPGEE – UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG
Tel.: +55 31 3409-5465 - Fax.: +55 31 3409-5480
www.ppgee.ufmg.br

INSTALAÇÃO DE CAPACITORES DE POTÊNCIA EM REDES POLUÍDAS POR HARMÔNICOS E COM BAIXA POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO

ROBERTA DANTAS RIBEIRO NAKAMURA

Dissertação defendida e aprovada em 27 de maio de 2011, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Elétrica**", na área de concentração de "**Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia**".

**Prof. Dr. Selênio Rocha Silva – Universidade Federal de Minas Gerais –
Orientador**

**Prof. Dr. Glássio Costa de Miranda – Universidade Federal de Minas Gerais –
Examinador**

**Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura – Universidade Federal de Minas Gerais –
Examinador**

Ao Flávio, meus pais
e irmã

RESUMO

A instalação de capacitores visando à correção do fator de potência e a proliferação de cargas não lineares no sistema aumentam significativamente a possibilidade de sobrecarga em equipamentos elétricos devido ao excesso de distorção harmônica. Este trabalho apresenta um estudo de caso em que a inclusão de cargas não lineares aliada à existência de frequências de ressonância em ordens indesejáveis e à baixa potência de curto-circuito da instalação elétrica tem como consequência a queima de bancos de capacitores de polipropileno metalizado (PPM) conectados a duas barras de uma indústria de pequeno porte. A partir das análises das características dos dispositivos e de medições nas barras, as causas das queimas precoces dos capacitores PPM são identificadas. Visando mitigar tal problema, soluções são analisadas e a instalação de um filtro sintonizado na barra com maior injeção de corrente harmônica é a alternativa que apresenta o melhor custo-benefício. Com o objetivo de prevenir a queima dos componentes do filtro, as tecnologias e as características do capacitor e do reator são discutidas e especificadas. Finalmente, estuda-se a influência da potência de curto circuito e da relação X/R da impedância da rede de alimentação nas distorções harmônicas e na variação da impedância das barras em análise. Busca-se com este trabalho auxiliar na conscientização de projetistas, para o problema da instalação de capacitores de potência em redes poluídas por harmônicos e com baixa potência de curto-circuito.

Palavras chave: Distorção Harmônica, Ressonância, Capacitores PPM, Baixa Potência de Curto-Circuito.

ABSTRACT

The power factor correction by means of capacitors and the proliferation of nonlinear loads in the electrical system strongly increases the probability of equipment overload due to excessive harmonic distortion. This work presents a case study in which the inclusion of non-linear loads, undesirable resonance frequencies and the plant low power short-circuit have as consequence the failure of metallized polypropylene (PPM) capacitors connected to two different bus bars in the electric system of a small mining plant. From the analysis of the device characteristics and electric measurements on the bus bars, the premature PPM capacitors failures are identified. To mitigate this problem, solutions are analyzed and the installation of a tuned filter in the bar with the highest harmonic current injection is the alternative that offers the best cost benefit ratio. Aiming to prevent the filter components failure, technologies and characteristics of the capacitor and reactor are discussed and specified. Finally, the influence of the short-circuit and X/R ratio of the supply network impedance on the harmonic distortion and impedance variation of the bus bars are discussed. The aim of this work is to be a reference for electrical system designers who deals with power factor correction with capacitors installation in harmonic polluted and low power short-circuit plants.

Key words: Harmonic Distortion, Resonance, PPM Capacitors, Low short-circuit power

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele não estaria aqui para escrever esta dissertação com saúde e paz.

Ao Flávio, marido, companheiro e amigo, pelo apoio e amor e pelas contribuições neste trabalho. Muito obrigada por compreender minhas ausências e pela grande paciência durante todo este período. Saiba que sem o seu amor e carinho tudo teria sido mais difícil; não falo apenas durante o mestrado, mas englobo também o período em que estudamos juntos na faculdade. Muito obrigada!

À minha mãe, melhor amiga, pela grande atenção, amor e dedicação durante toda a minha vida. Muito obrigada por me ouvir horas a fio sobre os problemas relacionados ao mestrado e estar sempre ao meu lado torcendo por mim, apesar da minha falta de tempo e assistência. Nunca me esquecerei das mensagens de paz e equilíbrio passadas e pela imensa torcida!

Ao meu pai e amigo pela paciência, amor e dedicação desde a minha infância, me ensinando a honestidade e a ver o melhor do ser humano. Ao meu pai-chefe pelo grande profissionalismo e por ter me liberado para concluir este mestrado, se sobrecarregando com os serviços da AC/DC Engenharia. Todo este trabalho, se Deus quiser, não será em vão!

Ao professor Selênio, meu orientador do mestrado, pela paciência, competência e por permitir a viabilização desta dissertação. Sua orientanda mais teimosa absorveu valiosos conhecimentos durante este período.

À minha avó pelo grande carinho durante todos estes anos, pelos conselhos e paciência de me ouvir. Desculpe-me a falta de disponibilidade e muito obrigada pela grande torcida! Ao meu avô que mesmo longe, sei que me acompanha e guia. À minha irmã Tamira pela torcida e apoio durante este período.

À IESA Projetos, Equipamentos e Montagens S/A, na pessoa do Engenheiro Flávio Resende Garcia, pela inestimável colaboração e transmissão de conhecimentos.

A todos os funcionários da AC/DC Engenharia pela paciência durante todo este período conturbado, em especial ao Samuel por instalar inúmeras vezes o analisador de qualidade de energia para aquisição das medições.

Ao Élcio Resende da Extração de Minérios Serra da Moeda pela disponibilização de informações, visitas técnicas e medições utilizadas no estudo de caso apresentado neste trabalho.

Ao amigo Gervásio pela boa vontade e sugestão de idéias utilizadas neste trabalho.

Ao meu sogro Dedé pelo incentivo e apoio. À minha sogra D. Alice pela grande torcida.

À tia Íris, tio Dólar, aos amigos Jura, Mônica e Genílson pela grande torcida, amizade e rezas para a conclusão deste trabalho.

A todas as pessoas que me auxiliaram durante toda a minha vida, o meu muito obrigada...

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e falasse as línguas dos anjos, sem amor eu nada seria...”

(Corintos 13)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	17
NOMENCLATURA	18
1 CAPÍTULO 1 –INTRODUÇÃO	21
1.1 Relevância	21
1.2 Objetivos	22
1.3 Contribuições.....	23
1.4 Estado da Arte.....	23
1.5 Metodologia.....	25
1.6 Organização do texto.....	26
2 CAPÍTULO 2 – O FATOR DE POTÊNCIA E AS COMPONENTES HARMÔNICAS.....	28
2.1 Causas do Baixo Fator de Potência e Benefícios da Instalação de Bancos de Capacitores.....	28
2.1.1 Utilização de bancos de capacitores fixos ou automáticos	30
2.2 Fontes de Harmônicos.....	30
2.3 Definições de Fator de Deslocamento, Fator de Potência e Fator de Distorção Harmônica.....	32
2.4 Ressonâncias entre Elementos Indutivos e Capacitivos do Sistema Elétrico ..	35
2.5 Efeitos dos Harmônicos e Resposta em Frequência das Cargas.....	37
2.6 Materiais Típicos de Fabricação dos Capacitores.....	39
2.6.1 Capacitores de Polipropileno Metalizado (PPM)	40
2.6.2 Impregnação a Óleo de Capacitores de Polipropileno Metalizado (PPM)	42
2.6.3 Capacitores Impregnados “All-Film”	42
2.7 Faturamento do Fator de Potência pela Concessionária	43

3	CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE CASO	47
3.1	Sistema Elétrico em Estudo	47
3.2	Características dos Bancos de Capacitores Danificados	49
3.3	Análise das Queimas dos Capacitores dos CCM's	50
3.3.1	Explicação Técnica para a Queima dos Capacitores	52
3.3.2	Outras Características dos Capacitores Verificadas em Campo	53
3.4	Potência Reativa Injetada no Sistema	53
3.5	Medição da Distorção Harmônica nos CCM's	54
3.6	Medição das Correntes Harmônicas Injetadas	56
3.7	Conclusão	61
4	CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO	63
4.1	Frequências de Ressonância do Sistema	63
4.2	Modelagem do Sistema Elétrico da Indústria	64
4.3	Validação da Modelagem do Sistema	67
4.4	Escaneamento das Impedâncias pela Frequência e Distorções Harmônicas nas Barras	68
4.5	Cálculo da Potência Reativa Necessária para a Correção do Fator de Potência	72
4.6	Análise da Influência da Impedância da Rede na Distorção da Tensão dos CCM's	74
4.6.1	Efeito da Alteração da Potência de Curto-Circuito na Distorção da Tensão dos CCM's	74
4.6.2	Efeito da Alteração da Relação X/R da Rede de Alimentação	77
4.6.3	Efeito das Alterações da Razão de Curto-Circuito e da Relação X/R	79
4.7	Definições do Filtro e do Banco de Capacitores nos CCM's	81
4.8	Análise da Influência do CCM-2 no CCM-1 através da Impedância de Transferência entre as duas barras	84
4.9	Divisão dos Capacitores em Estágios	85

4.10	Características do Filtro Sintonizado do CCM-2.....	86
4.10.1	Local da Instalação do Filtro de Harmônicos.....	87
4.10.2	Frequência de Sintonia do Filtro.....	87
4.10.3	Configuração do Filtro Sintonizado.....	88
4.10.4	Cálculo da Capacitância do Capacitor	89
4.10.5	Definição da Indutância do Reator	89
4.10.6	Definição do Fator de Qualidade do Filtro.....	90
4.10.7	Tensões e Correntes nos Elementos dos Filtros	91
4.11	Tecnologias para os Elementos do Filtro Sintonizado do CCM-2 e para o Capacitor do CCM-1.....	94
4.11.1	Tecnologia dos Capacitores.....	94
4.11.2	Tecnologia dos Reatores do Filtro Sintonizado.....	95
4.12	Condições Operacionais do Filtro e do Sistema a serem consideradas	96
4.13	Sequência de Energização dos Bancos e do Filtro Sintonizado	98
4.14	Análise do Desempenho do Filtro Sintonizado	99
4.15	Outras Soluções Possíveis	99
4.15.1	Instalação de Filtros Ativos com o Objetivo de se reduzir a Distorção Harmônica	99
4.15.2	Multiplicação de Fases nos Conversores	100
4.16	Conclusão	101
5	CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS DE EXTENSÃO.....	103
6	APÊNDICE.....	106
A.	Dados da rede de alimentação da indústria	106
B.	Dados internos a indústria	106
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Triângulo das potências	32
Figura 2.2 Tetraedro das potências	34
Figura 2.3 Circuito simplificado da ressonância série.	35
Figura 2.4 Circuito simplificado da ressonância paralela.	36
Figura 2.5 Vista esquemática das partes constituintes do capacitor de polipropileno metalizado	40
Figura 2.6 Etapas do processo de auto-regeneração do capacitor PPM.....	41
Figura 2.7 Vista esquemática das partes constituintes do capacitor impregnado “All Film”	42
Figura 3.1 Diagrama unifilar simplificado da instalação	48
Figura 3.2 Capacitores Epcos da Siemens utilizados na correção do fator de potência dos CCM’s 1 e 2.....	49
Figura 3.3 Controlador automático utilizado na correção do fator de potência dos CCM’s 1 e 2	50
Figura 3.4 Distorção harmônica na corrente verificada no banco de capacitores do CCM-1	51
Figura 3.5 Distorção harmônica na corrente obtida na medição do banco de capacitores do CCM-2	51
Figura 3.6 Ocorrência de harmônicas de tensão no CCM-1	55
Figura 3.7 Ocorrência de harmônicas de tensão no CCM-2	55
Figura 3.8 Espectro harmônico de ordens ímpares medido na corrente do retificador de 100kW.....	58
Figura 3.9 Espectro harmônico de ordens pares verificado na corrente do retificador de 100kW.....	61
Figura 4.1 Diagrama unifilar simplificado da instalação	65
Figura 4.2 Escaneamentos das impedâncias pela frequência no CCM-1 para quatro diferentes configurações de potências reativa.....	69
Figura 4.3 Escaneamentos das impedâncias pela frequência no CCM-2 para quatro diferentes configurações de potências reativa.....	69
Figura 4.4 Escaneamentos das impedâncias pela frequência para os CCM’s 1 e 2 considerando potências reativas de 175kVAr e 100kVAr nas duas barras.	74

Figura 4.5 Impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1, obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito, desconsiderando-se o filtro.	75
Figura 4.6 Impedâncias próprias na barra do CCM-2 obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito, desconsiderando-se o filtro.	76
Figura 4.7 Impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1 obtidas a partir da variação da relação X/R da rede de alimentação, desconsiderando-se o filtro.	78
Figura 4.8 Escaneamentos das impedâncias pela frequência para o CCM-2, considerando a variação da razão X/R da rede, desconsiderando-se o filtro.	79
Figura 4.9 Impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1 obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito e da relação X/R da rede, sem o filtro.	80
Figura 4.10 Impedâncias próprias do CCM-2 obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito e da relação X/R da rede, sem o filtro.	80
Figura 4.11 Escaneamentos das impedâncias pela frequência considerando o banco de capacitores para o CCM-1 e o filtro sintonizado para o CCM-2.	83
Figura 4.12 Impedância de transferência entre os CCM's 2 e 1 considerando capacitores de 100 e 175 kVAr, respectivamente, e desconsiderando o filtro.	84
Figura 4.13 Impedância de transferência entre os CCM's 2 e 1 considerando o filtro e o capacitor de 175 kVAr, respectivamente.	85
Figura 4.14 Configurações mais comuns para filtros sintonizados com conexão isolada.	88
Figura 4.15 Configuração do filtro sintonizado instalado no CCM-2	89
Figura 4.16 Capacitor impregnado utilizado no filtro e no capacitor do CCM-1. Fabricante: Iesa Inepar.	95
Figura A.1. Diagrama unifilar simplificado da indústria	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Grandezas obtidas nas medições dos capacitores dos CCM's 1 e 2.....	50
Tabela 3.2 Níveis admissíveis e tolerâncias para capacitores auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão máxima de 1000V	50
Tabela 3.3 Níveis de referência para distorções harmônicas totais na tensão	54
Tabela 3.4 Níveis de referência para distorções harmônicas individuais na tensão	54
Tabela 3.5 Espectro harmônico típico fornecido pelo fabricante do retificador de 100kW	57
Tabela 3.6 Espectro harmônico de ordem ímpar da corrente medido no retificador de 100kW.....	57
Tabela 3.7 Valores das tensões de linha das barras obtidas a partir da medição.....	59
Tabela 4.1 Espectro harmônico da corrente absorvida pelo filtro sintonizado coletado em campo.....	67
Tabela 4.2 Distorções harmônicas nos CCM's obtidas a partir da simulação para quatro diferentes configurações de potências reativa.....	71
Tabela 4.3 Distorções harmônicas encontradas através da variação da razão de curto-circuito da rede de alimentação, desconsiderando-se o filtro.	75
Tabela 4.4 Distorções harmônicas encontradas através da variação da razão X/R da linha de alimentação da mineradora.	77
Tabela 4.5 Distorções harmônicas obtidas variando-se a relação X/R da rede e a razão de curto-circuito, sem o filtro.....	80
Tabela 4.6 Distorções harmônicas medidas sem a presença dos bancos de capacitores.	81
Tabela 4.7 Distorções harmônicas obtidas através da simulação do sistema, considerando o banco de capacitores de 175 kVAr e o filtro sintonizado para os CCM's 1 e 2, respectivamente.	83
Tabela 4.8 Espectro harmônico esperado na tensão do capacitor do filtro sintonizado .	92
Tabela 4.9 Conteúdo harmônico de corrente esperado no filtro sintonizado, obtido na simulação.	94
Tabela 4.10 Condições operacionais do filtro consideradas na simulação	96
Tabela 4.11 Condições operacionais do sistema elétrico consideradas na simulação	97
Tabela A.1 Dados da rede de alimentação da indústria.....	106
Tabela A.2 Especificação técnica dos transformadores de 500kVA.....	107

Tabela A.3 Quantidade e potência dos motores alimentados pelo CCM-1	108
Tabela A.4 Quantidade e potência dos motores alimentados pelo CCM-2	108
Tabela A.5 Especificação técnica dos transformadores de 300kVA.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
NBR	Normas Brasileiras
PPGEE	Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
PPM	Polipropileno Metalizado
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
Std	Standard

NOMENCLATURA

%	Porcentagem
ΔV	Aumento percentual da tensão (%)
A	Ampère
a	Amplitude teórica da corrente harmônica (p.u.)
C	Capacitância (Faradays)
CCM	Centro de comando de motores
CCM-1	Centro de comando de motores um
CCM-2	Centro de comando de motores dois
cv	Cavalos
D	Fator de distorção total (VA)
D_{RE}	Valor da demanda de potência reativa excedente (kW)
DTT	Distorção harmônica total de tensão
$EEMA_T$	Energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” (MWh)
E_{RE}	Valor correspondente à energia elétrica reativa excedente (Reais)
f	Frequência (Hertz)
f.p.	Fator de potência
FD	Fator de deslocamento
fp1	Fator de potência original da instalação
fp2	Fator de potência desejado
f_R	Fator de potência de referência
f_T	Fator de potência calculado em cada intervalo “T” de uma hora
h	Número da ordem harmônica (p.u.)
Hz	Hertz
I	Corrente (Ampères)
I_1	Valor da corrente na frequência fundamental (Ampères)
I_h	Valor da corrente na ordem harmônica “h” (Ampères)
k	kilo
kW	Quilowatts
L	Indutância (Henry)
m	mili
MAX	Função que identifica o valor máximo da equação

min	Minuto
n	Número inteiro
n ^o	Número
P	Potência ativa total (Watts)
p	Número de pulsos do conversor (p.u.)
P ₁	Potência ativa na frequência fundamental (Watts)
PAF	Demanda de potência ativa faturável (kW)
PAM _T	Demanda de potência ativa medida no intervalo “T” (kW)
q	Fator de qualidade do filtro
Q	Potência reativa total (VAr)
Q ₁	Potência reativa na frequência fundamental (VAr)
Q _{capacitor}	Potência reativa trifásica do banco de capacitores (kVAr)
R	Resistência do filtro (Ohms)
S	Potência aparente total (VA)
S ₁	Potência Aparente na frequência fundamental (VA)
S _{cs}	Potência de curto-circuito (kVA)
S _{trafo}	Potência nominal do transformador (em kVA)
T	Intervalo de uma hora
t	Tempo (segundos)
THD _I	Distorção harmônica total na corrente
THD _v	Distorção harmônica total na tensão
V	Tensão (Volts)
V	Volts
V ₁	Valor da Tensão na frequência fundamental (Volts)
VA	Volt Ampère
V _{ab}	Tensão entre as fases “a” e “b” (Volts)
V _{bc}	Tensão entre as fases “b” e “c” (Volts)
V _{ca}	Tensão entre as fases “c” e “a” (Volts)
VAr	Volt Ampère reativo
V _c	Tensão máxima na frequência fundamental (Volts)
V _h	Valor da tensão verificada na ordem harmônica “h” (Volts)
V _N	Valor da tensão nominal (Volts)
VR _{DRE}	Valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência
VR _{ERE}	Valor de referência equivalente à tarifa de energia (Reais por MWh)

V_s	Tensão máxima aplicada (Volts)
X/R	Razão entre a reatância indutiva e a resistência da rede (p.u.)
X_c	Reatância do capacitor na frequência fundamental (Ohms)
X_L	Reatância indutiva na frequência fundamental (Ohms)
X_O	Reatância do indutor na frequência de sintonia (Ohms)
Z_h	Impedância do sistema na ordem harmônica “h” (Ohms)
Z_{trafo}	Impedância do transformador (em p.u.)
δ_h	Ângulo da corrente na ordem harmônica “h” (graus)
θ_h	Ângulo da tensão em cada ordem harmônica “h” (graus)
θ_{hMED}	Ângulo medido em cada ordem harmônica (graus)
θ_{V_1}	Ângulo na tensão fundamental (graus)
μF	Microfarad
μH	Microhenrys
ϕ	Deslocamento entre as fases da tensão e da corrente (graus)

CAPÍTULO 1 –INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um estudo de caso em que a inclusão de cargas não lineares e a existência de frequências de ressonância em ordens indesejáveis resultam na queima de capacitores em duas barras do sistema elétrico de uma indústria de pequeno porte. A baixa potência de curto-circuito da instalação possibilitou a análise da influência que a impedância da rede de alimentação exerce na impedância e nas distorções das barras em que as queimas foram verificadas, além de permitir a análise da influência que capacitores instalados em ramificações próximas exercem na barra em questão.

1.1 Relevância

No Brasil, constam nos contratos firmados entre concessionárias de energia e consumidores do grupo A, composto por unidades com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3kV, sobretaxas devido ao baixo fator de potência indutivo durante o período de 18 horas consecutivas compreendido entre 5h 30min e 0h 30min. Normalmente, a solução mais utilizada na melhoria do fator de potência por consumidores consiste na instalação de bancos de capacitores de potência.

O avanço da tecnologia com o uso de equipamentos eletrônicos e de cargas a velocidade variável aumentou a eficiência energética e a versatilidade das instalações consumidoras, porém veio acompanhada de um inconveniente: a geração de correntes harmônicas no sistema elétrico. Índices elevados de distorções harmônicas podem causar interferências no sistema de comunicação, reduzir a capacidade de condução da potência pelo sistema elétrico e, em casos extremos, em queimas prematuras equipamentos elétricos. Como a reatância dos capacitores reduz com o aumento da frequência, estes dispositivos se tornam um dreno para correntes com frequências mais elevadas e são, usualmente, os primeiros equipamentos elétricos a apresentarem queimas precoces, em instalações com níveis elevados de distorções harmônicas.

O crescente uso de cargas eletrônicas no sistema elétrico gerou duas preocupações. A primeira está relacionada com o aumento da distorção harmônica gerada na tensão e na forma de onda da corrente por estes dispositivos e a segunda diz respeito à qualidade da energia exigida para o perfeito funcionamento destes

equipamentos. A aprovação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) no Sistema Elétrico Nacional reflete a preocupação das concessionárias com os processos de regulamentação e fiscalização da qualidade da energia fornecida para os consumidores.

Em sistemas elétricos com baixa potência de curto-circuito, as grandezas do sistema elétrico são bastante afetadas pelas características da carga, isto é, variações na corrente requerida pela carga resultam em grandes modificações no valor da tensão fornecida. Desta forma, em redes elétricas com baixa potência de curto-circuito, os efeitos descritos da instalação de cargas não lineares são mais pronunciados e devem ser melhor estudados, devido à maior dificuldade de absorção do distúrbio pelo sistema elétrico.

A distorção periódica de corrente pode ser gerada através das seguintes maneiras: em situações onde a carga a ser instalada é linear, mas está sujeita a distorções harmônicas presentes na tensão da rede e onde a carga é também geradora de distúrbios harmônicos em redes poluídas ou não. Em muitos casos, o uso de cargas não lineares não apresenta por si só maiores consequências, o problema, porém, pode agravar-se existindo a possibilidade de amplificação de corrente e de tensão pela ressonância entre os capacitores de potência e as indutâncias do sistema elétrico. Desta forma, um estudo de harmônicos deve ser conduzido para a instalação de equipamentos elétricos e capacitores de potência em redes com grande concentração de cargas não lineares.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar e propor soluções para um caso real em que a inclusão de cargas não lineares resultou na queima de capacitores responsáveis pela correção do fator de potência de uma indústria de pequeno porte instalada em um sistema elétrico com baixa potência de curto-circuito. Também é interesse no presente estudo, a compreensão da influência da potência de curto-circuito e da relação X/R da impedância da rede de alimentação nas distorções harmônicas e nas impedâncias das barras em análise, além da avaliação completa de soluções possíveis para mitigar os problemas.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Apresentar as causas das queimas dos capacitores e discutir as vulnerabilidades da tecnologia destes dispositivos.
- Analisar a solução que apresentou o melhor custo-benefício na mitigação dos harmônicos, apontando seus pontos fracos e vantagens.
- Projetar um filtro sintonizado, para o caso em questão, agregando ao trabalho a engenharia de projeto convencional.
- Discutir, através de simulações, a influência que capacitores instalados em barras próximas exercem na impedância da barra em análise.
- Avaliar os efeitos da baixa potência de curto-circuito no sistema em questão.

1.3 Contribuições

Entende-se como contribuições deste trabalho a análise da influência da rede de alimentação, mais especificamente da potência de curto-circuito e da relação X/R da impedância, nas distorções harmônicas e nas impedâncias das barras, a discussão dos benefícios da instalação de filtros passivos na mitigação de harmônicos e a análise das características dos componentes do filtro sintonizado e dos capacitores em que as queimas foram verificadas.

Assim este trabalho busca ajudar na consolidação de um procedimento de engenharia que se estabeleceu a algumas décadas, mas que sempre é motivo de questionamentos e de interpretações diversas.

1.4 Estado da Arte

A instalação de capacitores na correção do fator de potência é muito usual, sendo que os cálculos utilizados na determinação da potência reativa e as vantagens do método são bastante difundidos na literatura técnica. Este tema pode ser facilmente compreendido através das explicações contidas em Mamede (2001), no guia IEEE 1036-19 (IEEE(2), 1992) e no trabalho de Shwehdi (2000).

Na apuração dos valores correspondentes à energia elétrica e à demanda de potência reativas excedentes por concessionárias de energia, os efeitos das distorções

harmônicas são negligenciados, porém como danificam equipamentos elétricos e sobrecarregam condutores, as características dos harmônicos devem ser estudadas detalhadamente. Uma das referências mais completas sobre harmônicos, Arrilaga (2003) discute sobre as fontes, os métodos de análise e medição de harmônicos e seus efeitos em equipamentos elétricos. Já Dugan (2004) e o guia de recomendação do IEEE (1994) explicam de forma geral, mas não menos valiosa, sobre o tema, apresentando as características essenciais, os problemas decorrentes e os principais métodos de mitigação de harmônicos.

Como capacitores são um dos equipamentos mais afetados por harmônicos, sua instalação em redes com elevadas distorções é assunto bastante discutido por autores, em especial pelos trabalhos de Teixeira (2007), Duarte (2002) e Garcia (2001) e (2005). Já as características e a grande vulnerabilidade dos capacitores de polipropileno metalizado (PPM) frente às correntes harmônicas são apresentadas por Sarjeant (1998), Nucci (1991) e Xin (2000), sendo que as generalidades, os ensaios e a classificação de capacitores auto-regenerativos com tensão máxima de 1000V (que incluem os dispositivos com tecnologia PPM) são definidos pela norma NBR IEC 60831-1 (ABNT, 2009).

As características e as respostas em frequência de filtros passivos, uma das técnicas mais utilizadas na mitigação de harmônicos, são discutidas pelos trabalhos de Bonner (1995), Sutanto (1991) e King (2009). Porém, o guia IEEE 1531 (IEEE, 2003) aborda o tema de forma mais completa, ao identificar as condições operacionais do filtro e do sistema que devem ser consideradas, apresentar os cálculos que devem ser feitos na especificação técnica dos elementos do filtro e comparar as vantagens obtidas na instalação destes equipamentos nas barras de distribuição e em cargas individuais.

No Brasil, o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência e define os níveis de referência para distorções harmônicas individuais e totais. Pelo fato do PRODIST não definir limites e sim valores de referência, atualmente no país, unidades consumidoras que possuem níveis elevados de distorções harmônicas não são sobretaxadas e os valores adquiridos nas medições servem apenas como referência para o planejamento elétrico e serão, após um tempo experimental, estabelecidos em uma resolução específica. No âmbito internacional, o guia IEEE 519 (IEEE(1), 1992) estabelece níveis de referência para as distorções harmônicas mais restritivos quando

comparados aos definidos pelo PRODIST, tendo seus índices utilizados por projetistas como base na proteção dos equipamentos elétricos frente à harmônicos.

Sistemas com maior potência de curto-circuito são menos susceptíveis a distúrbios elétricos, situação retratada pelo trabalho de Allegranza (2007). No que concerne a harmônicos, o guia de recomendação prática do IEEE (1994) é taxativo ao mencionar que “sistemas robustos (aqueles com capacidade de curto-circuito maiores) têm distorções na tensão menores, para a mesma magnitude de fonte de corrente harmônica, que as obtidas em um sistema fraco (sistemas com capacidade de curto-circuito menores)”. O guia IEEE 519 reconhece que os efeitos da instalação de cargas não lineares em sistemas com potência de curto-circuito menores são mais pronunciados, ao limitar os níveis de referência das distorções harmônicas individuais de corrente baseados na razão entre a potência de curto-circuito no ponto de instalação e a potência da carga não linear. Em suma, em sistemas com baixa potência de curto-circuito, a preocupação com a instalação de equipamentos elétricos em redes poluídas por harmônicos deve ser ainda maior.

1.5 Metodologia

A análise do tema da dissertação é baseada em um caso real, em que a inclusão de cargas não lineares em um sistema com baixa potência de curto-circuito resultou na queima de capacitores, utilizados na correção do fator de potência da instalação elétrica. Primeiramente, para a identificação da causa das freqüentes queimas, são realizadas medições nos bancos de capacitores com um analisador de qualidade da energia elétrica. A segunda etapa consiste em medições em duas barras de distribuição para a identificação do espectro harmônico existente no sistema elétrico da indústria. Finalmente, os espectros harmônicos injetados no sistema elétrico por todos os conversores de frequência são medidos.

Um modelo detalhado do sistema elétrico da indústria é analisado a partir do Superharm, um programa de simulação de harmônicos que possibilita a identificação da distorção harmônica e do escaneamento da impedância pela frequência nas barras do sistema. A modelagem do sistema elétrico é realizada a partir dos dados de placa dos motores, capacitores e transformadores instalados na indústria, das impedâncias das linhas internas e da rede de alimentação (calculada através da corrente de curto-circuito

fornecida pela concessionária local). Os espectros harmônicos injetados pelas cargas não lineares também são dados de entrada do programa e são obtidos a partir das medições realizadas na entrada dos conversores.

Visando à confirmação de que o sistema elétrico da indústria foi modelado corretamente, os resultados obtidos na simulação são comparados com os dados das medições realizadas nas barras de distribuição. Os resultados da simulação também são utilizados na análise de desempenho do filtro sintonizado, alternativa escolhida para a mitigação dos harmônicos.

1.6 Organização do texto

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, a partir da estrutura detalhada a seguir.

O capítulo 2 se propõe a revisar conceitos importantes relacionados à correção do fator de potência e a harmônicos. Nele, são apresentadas as causas do baixo fator de potência em unidades consumidoras, os benefícios da instalação de capacitores, as diferenças entre as definições de fator de potência e fator de deslocamento e a forma de faturamento do fator de potência pelas concessionárias. No que concerne a harmônicos, são identificados seus efeitos em equipamentos elétricos e as principais fontes de harmônicos. Também são estudadas as ressonâncias entre os elementos indutivos e capacitivos do sistema elétrico e as vulnerabilidades frente a harmônicos das duas principais tecnologias de capacitores utilizadas na correção do fator de potência em aplicações de baixa tensão.

No capítulo 3, o sistema elétrico da indústria em que foram verificadas as queimas dos capacitores é apresentado e as causas de tais problemas são estudadas. Adicionalmente, os resultados das medições realizadas nos bancos de capacitores, nos barramentos de distribuição e na entrada dos conversores são analisados e comparados com os níveis de referência estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST.

No capítulo 4, as potências reativas necessárias para a devida correção do fator de potência nos CCM's são calculadas e o modelo completo do sistema elétrico da indústria é simulado em um programa de harmônicos, revelando as distorções harmônicas e as frequências de ressonância obtidas nas duas barras em que as queimas dos capacitores foram verificadas. São analisadas alternativas para a mitigação dos

harmônicos nas barras, sendo a instalação do filtro sintonizado na barra com maior injeção de corrente harmônica no sistema, a opção que apresenta o melhor custo-benefício. A configuração, as características e as tecnologias dos componentes do filtro são definidas e estudadas. No final do capítulo, são verificadas as influências que a potência de curto-circuito e a relação X/R da impedância da rede de alimentação exercem nas distorções e na resposta em frequência das impedâncias das barras em análise.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho, analisando o desempenho do filtro e os resultados obtidos.

CAPÍTULO 2 – O FATOR DE POTÊNCIA E AS COMPONENTES HARMÔNICAS

Este capítulo se propõe a revisar aspectos importantes relacionados à correção do fator de potência e às componentes harmônicas. São abordadas as principais fontes de harmônicos, as ressonâncias entre elementos indutivos e capacitivos do sistema e as definições de fator de potência, fator de deslocamento e distorção harmônica. Também são apresentadas as principais tecnologias de capacitores utilizadas na correção do fator de potência em aplicações de baixa tensão e as equações aplicadas por concessionárias de energia elétrica no Brasil no faturamento da energia e da demanda de potência reativas excedentes.

2.1 Causas do Baixo Fator de Potência e Benefícios da Instalação de Bancos de Capacitores

Grande parte das cargas utilizadas por consumidores industriais, residenciais e comerciais é de natureza indutiva e utiliza campos magnéticos para seu adequado funcionamento. A potência requerida para excitação destes campos magnéticos, denominada de potência reativa, não é transformada em trabalho, aumentando a corrente requerida e deteriorando a eficiência do sistema elétrico.

O fator de potência é um indicador objetivo que reflete a eficácia da instalação ao relacionar a potência transformada em trabalho (potência ativa) com a potência de entrada requerida pela carga, chamada de potência aparente. O valor do fator de potência pode variar de zero a um, e quanto mais próximo da unidade, mais eficaz o sistema será no processo de conversão e fluxo de energia.

Segundo Mamede (2001), as causas mais frequentes do baixo fator de potência em uma instalação elétrica são as seguintes: motores de indução trabalhando a vazio, motores superdimensionados para as máquinas a eles acoplados, transformadores em operação a vazio ou em carga leve, grande número de reatores de baixo fator de potência suprimindo lâmpadas de descarga, fornos a arco, fornos de indução eletromagnética, máquinas de solda a transformador, equipamentos eletrônicos e um grande número de motores de pequena potência.

Como a alimentação de cargas indutivas implica em fluxo de potência reativa pelas redes elétricas, caso o valor do fator de potência seja inferior ao valor estipulado pelos órgãos competentes, as concessionárias fornecedoras podem sobretaxar seus consumidores.

Geralmente, a solução mais adequada para elevar o fator de potência consiste na instalação de bancos de capacitores. Estes dispositivos fornecem a potência reativa necessária para neutralizar a corrente de magnetização dos equipamentos indutivos (SHWEHDI, 2000).

As vantagens obtidas a partir da instalação de capacitores consistem em redução das sobretaxas impostas por concessionárias, diminuição de perdas nas linhas, além do aumento da capacidade de transmissão de potência pelo sistema, o que, em muitos casos, pode reduzir custos de investimentos em infra-estrutura (como a instalação de novos geradores e transformadores), ou postergá-los.

Como a instalação de capacitores reduz a queda de tensão nas linhas de transmissão e distribuição, pela diminuição do módulo da corrente, esta resulta em uma melhor regulação da tensão do sistema. Segundo o guia IEEE 1036-1992, a elevação da tensão no ponto de conexão do banco pode ser estimada através da equação (2.1):

$$\Delta V = \frac{Q_{\text{capacitor}} \times X_L}{10 \times (V)^2} \quad (2.1)$$

Onde:

ΔV = aumento percentual da tensão no ponto de instalação dos capacitores (%)

$Q_{\text{capacitor}}$ = potência reativa trifásica do banco de capacitores (kVAr)

X_L = reatância indutiva do sistema elétrico no ponto de instalação do banco (Ohms)

V = tensão de linha do sistema, verificada antes da instalação do banco (kV)

Para a otimização dos benefícios descritos, os capacitores devem ser instalados o mais próximo possível das cargas indutivas sendo, contudo, o problema de locação ótima não óbvio em sistemas elétricos complexos.

Outra causa bastante comum para a identificação do baixo fator de potência está relacionada à desconexão de cargas indutivas e à permanência de capacitores nas instalações, durante a noite. Como resultado, nestes períodos, o sistema elétrico tende a ter um fator de potência mais capacitivo. Visando à elevação da eficácia na distribuição

da energia, concessionárias sobretaxam os consumidores pelo excesso de potência reativa capacitiva durante o período da noite, conforme descrito anteriormente.

2.1.1 Utilização de bancos de capacitores fixos ou automáticos

Em sistemas industriais, a correção do fator de potência é realizada principalmente através de duas formas: bancos de capacitores fixos ou automáticos.

Bancos de capacitores fixos são, geralmente, energizados em um período contínuo do dia e desconectados durante a noite, evitando que o consumidor seja sobretaxado por apresentar um fator de potência capacitivo inferior a 0,92. Em sistemas elétricos com grande variação da demanda de potência reativa, o chaveamento destes capacitores deverá ser realizado de forma sazonal, acompanhando esta alteração (IEEE(2), 1992). Nestes locais, devido ao grande trabalho em se conectar e desconectar bancos, avaliando-se a variação da demanda de potência reativa, opta-se, na maioria das vezes, pela correção automática do fator de potência.

Nos bancos de capacitores automáticos, um controlador supervisiona as grandezas elétricas do sistema, identifica a potência reativa necessária para correção do fator de potência e envia sinais para a energização ou desenergização de capacitores, divididos em estágios.

Os bancos de capacitores fixos são largamente utilizados em indústrias devido ao seu baixo custo de implantação, porém, quando na instalação elétrica há uma variação muito significativa de demanda de potência reativa ao longo do dia seu uso torna-se inviável e sua aplicação ineficaz.

2.2 Fontes de Harmônicos

Elementos indutivos, resistivos e capacitivos ao serem submetidos a uma tensão puramente senoidal geram correntes com amplitudes proporcionais, sendo chamados de cargas lineares. Equipamentos que produzem correntes não proporcionais à tensão aplicada, gerando ondas não senoidais, são chamados de cargas não lineares ou fontes de harmônicos. A teoria de Fourier afirma que qualquer onda periódica pode ser decomposta por componentes harmônicas, que são aquelas cuja frequência é múltipla da frequência fundamental.

As principais fontes de harmônicos são conversores de frequência, equipamentos eletrônicos e fornos a arco. Caso estes equipamentos sejam alimentados com tensão puramente senoidal, em condição normal de operação, eles geram harmônicos conhecidos, comumente denominados harmônicos característicos.

Em aplicações industriais, os conversores de frequência são largamente utilizados e geram correntes harmônicas teóricas relacionadas ao número de pulsos com amplitudes que decrescem na proporção inversa à ordem harmônica (IEEE(1), 1992). Os conversores de 6 e 12 pulsos são os mais utilizados, mas, genericamente, as ordens e amplitudes harmônicas associadas podem ser calculadas por:

$$h = kp \pm 1 \quad (2.2)$$

$$a = \frac{1}{h} \quad (2.3)$$

Sendo:

h = número da ordem harmônica característica gerada pelo conversor

p = número de pulsos do conversor (6, 12, 18, 24 ou 36)

k = números inteiros 1, 2, 3, etc

a = amplitude teórica da corrente harmônica injetada pelo equipamento (p.u.)

As equações (2.2) e (2.3) revelam que um conversor de seis pulsos gera harmônicos característicos com amplitudes mais significativas de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a ordens, enquanto um equipamento de doze pulsos produz ordens características mais elevadas (11^o e 13^o harmônicos).

Uma característica peculiar a maioria dos conversores de frequência está relacionada à dependência entre a injeção de harmônicos no sistema elétrico e seu carregamento, exibindo maiores níveis de distorções na corrente para cargas menores (ALMONTE, 1995). Nestes equipamentos, as correntes harmônicas se reduzem em uma proporção menor que a corrente na frequência fundamental, o que aumenta a distorção harmônica total na corrente para carregamentos menores.

Fornos a arco são largamente utilizados na indústria siderúrgica e geram correntes com conteúdo harmônico altamente distorcido, que sofrem alterações significativas durante o ciclo, apresentando um caráter bastante aleatório. No espectro

liberado por esses equipamentos, verifica-se que os harmônicos de ordem mais baixa prevalecem e que as ordens pares estão presentes.

Durante a energização de transformadores, harmônicos de 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordens são identificados. Porém, por caracterizarem situações transitórias e infreqüentes, estes eventos, normalmente, não representam um problema considerável.

2.3 Definições de Fator de Deslocamento, Fator de Potência e Fator de Distorção Harmônica

O fator de deslocamento relaciona a potência efetivamente transformada em trabalho com a máxima capacidade de potência demandada no sistema, caracterizando a razão entre a potência ativa e a potência aparente, ambas estando na frequência fundamental e desconsiderando a distorção harmônica. Esse fator também pode ser definido, a partir do triângulo das potências, como o cosseno do ângulo de deslocamento entre as fases da tensão e da corrente, na frequência fundamental, situação apresentada na figura (2.1).

$$FD = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\varphi) \quad (2.4)$$

onde:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (2.5)$$

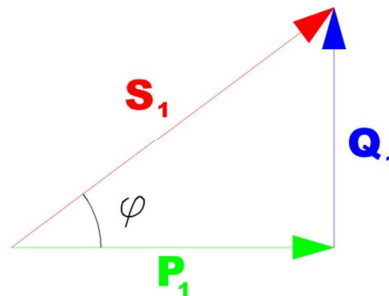


Figura 2.1 Triângulo das potências

Sendo:

FD = Fator de Deslocamento

P_1 = Potência ativa na frequência fundamental (Watts)

Q_1 = Potência reativa na frequência fundamental (VAr)

S_1 = Potência Aparente na frequência fundamental (VA)

φ = Deslocamento entre as fases da tensão e da corrente (graus)

A presença de potências reativas e tensões e correntes distorcidas por harmônicos adiciona perdas de energia ao sistema, reduzindo, por consequência, sua eficiência. O fator de potência contempla essas perdas ao ser definido como a razão entre a potência ativa total e a potência aparente total, situação que considera as grandezas na frequência fundamental e nas frequências harmônicas, conforme equação (2.6).

As potências ativas e reativas totais são calculadas a partir da soma das tensões e correntes correspondentes à mesma ordem harmônica, identificadas nas equações (2.7) e (2.8), respectivamente. O acréscimo do novo termo (potência de distorção) faz com que a potência aparente total deixe de ser calculada através de um triângulo, para ser definida a partir de um tetraedro das potências, apresentado na figura (2.2):

$$\text{f. p.} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2.6)$$

Onde:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \times I_h \times \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (2.7)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \times I_h \times \text{sen}(\theta_h - \delta_h) \quad (2.8)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.9)$$

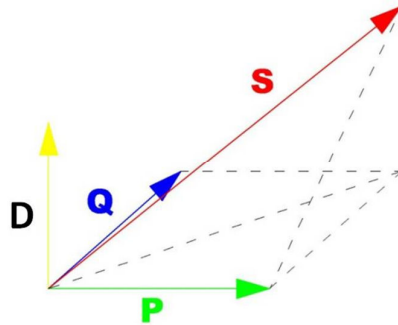


Figura 2.2 Tetraedro das potências

Considerando:

f.p. = fator de potência

P = potência ativa total (Watts)

Q = potência reativa total (VAr)

D = fator de distorção total (VA)

S = potência aparente total (VA)

V_h = tensão em cada ordem harmônica “h” (Volts)

I_h = corrente na ordem harmônica “h” (Ampères)

θ_h = ângulo da tensão em cada ordem harmônica “h” (graus)

δ_h = ângulo da corrente na ordem harmônica “h” (graus)

Em sistemas poluídos por harmônicos, o cálculo da distorção harmônica total é bastante utilizado para quantificar a gravidade do problema. Este termo é definido como a razão entre a raiz da soma quadrática das amplitudes de todos harmônicos e a amplitude da grandeza na frequência fundamental e pode ser expresso tanto para a tensão, equação (2.10), quanto para a corrente, equação (2.11):

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.10)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.11)$$

Sendo:

THD_v = distorção harmônica total na tensão

V_h = valor eficaz da tensão verificada na ordem harmônica “h” (Volts)

V_1 = valor eficaz da tensão na frequência fundamental (Volts)

THD_I = distorção harmônica total na corrente

I_h = valor eficaz da corrente verificada na ordem harmônica “h” (Ampères)

I_1 = valor eficaz da corrente na frequência fundamental (Ampères)

O fator de potência sempre é menor ou igual ao fator de deslocamento, situação atingida apenas quando não existam distorções na tensão e na corrente.

2.4 Ressonâncias entre Elementos Indutivos e Capacitivos do Sistema Elétrico

A associação de capacitâncias e indutâncias no sistema elétrico pode criar ressonâncias entre estes elementos. Existem, basicamente, duas formas de ressonância: a série e a paralela.

Na primeira alternativa, o capacitor e o primário do transformador estão em série com a fonte de harmônicos, situação evidenciada na figura (2.3). Na ressonância série, quando os valores das reatâncias capacitiva e indutiva são iguais em uma determinada frequência, a impedância vista pela fonte é praticamente nula, o que pode resultar em circulação de correntes harmônicas em caminho ressonante específico com consequências em sobrecarregamento de equipamentos e sobretensões individuais.

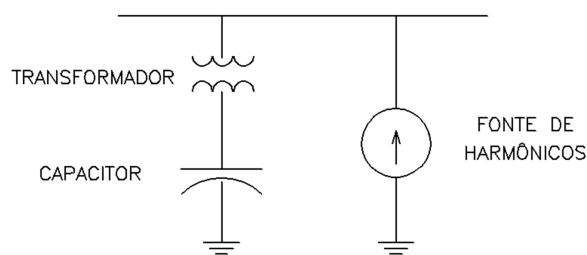


Figura 2.3 Circuito simplificado da ressonância série.

Já na ressonância paralela, identificada na figura (2.4), as reatâncias indutiva e capacitiva estão em paralelo com a fonte não linear. Neste caso, quando em uma dada frequência o módulo das duas impedâncias é igual, o valor desta grandeza visto pela

fonte é elevado e correntes harmônicas poderão gerar tensões elevadas no terminal dos três elementos: capacitor, indutor e fonte.

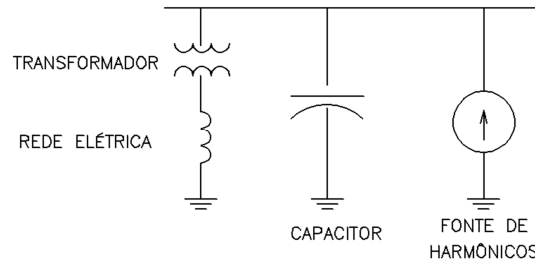


Figura 2.4 Circuito simplificado da ressonância paralela.

Os dois modelos apresentados desconsideram os componentes resistivos, uma vez que, geralmente, os mesmos apenas introduzem amortecimento, afetando a banda passante do circuito.

Na ressonância paralela, a frequência de ressonância pode ser calculada igualando-se os módulos das reatâncias capacitiva e indutiva ou a partir da raiz da razão entre a potência de curto-circuito e a potência do banco de capacitores, conforme equação (2.12):

$$h = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_{capacitor}}} \quad (2.12)$$

Onde:

h = ordem harmônica em que a ressonância ocorre

S_{cs} = potência de curto-circuito na barra de análise (kVA)

$Q_{capacitor}$ = potência reativa do banco de capacitores (kVAr)

O problema referente à poluição harmônica pode ser explicado de forma bastante simples através da aplicação da lei de Ohm, conforme apresentado por Ahrens (2005):

$$V_h = Z_h \times I_h \quad (2.13)$$

Sendo:

h = ordens harmônicas

V_h = tensão na ordem harmônica “ h ” (Volts)

Z_h = impedância do sistema obtida a partir da associação das reatâncias indutivas e capacitivas na ordem harmônica “ h ” (Ohms)

I_h = corrente na ordem harmônica “ h ” (Ampères)

A equação (2.13) revela que a tensão harmônica é diretamente proporcional à corrente injetada no sistema elétrico e à impedância vista pela fonte, nas respectivas frequências. Quando ocorre a ressonância paralela, o módulo da impedância vista pela fonte é bastante elevado e caso existam correntes harmônicas nesta frequência, tensões elevadas podem ser verificadas nos terminais dos elementos.

Na ressonância série, que também pode ser explicada através da equação (2.13), a impedância do sistema na frequência de ressonância tem módulo reduzido e tensões harmônicas, mesmo que pequenas, podem resultar em valores elevados de correntes nos elementos.

A partir dos dados apresentados, conclui-se que a associação de capacitores, indutâncias e cargas não lineares, principalmente em condições de ressonância, pode resultar em níveis elevados de distorções harmônicas, tanto na tensão quanto na corrente.

2.5 Efeitos dos Harmônicos e Resposta em Frequência das Cargas

Em locais poluídos por harmônicos, a instalação de bancos de capacitores, visando à correção do fator de potência, pode criar ressonâncias em frequências indesejáveis. Como a reatância capacitiva se reduz com o aumento da frequência, equação (2.14), este constitui um dreno para as correntes com ordens harmônicas mais elevadas. Distorções harmônicas aumentam as tensões e as correntes às quais os capacitores estarão submetidos e ocasionam uma fadiga no dielétrico, reduzindo, por consequência, sua vida útil.

$$X_c = \frac{1}{2\pi \times f \times C} \quad (2.14)$$

Sendo:

X_c = impedância do capacitor (Ohms)

f = frequência (Hertz)

C = capacitância (Farad)

Apesar dos capacitores serem, usualmente, os primeiros a apresentarem falhas, outros equipamentos também podem ser danificados e cada tipo de equipamento reage de forma diferente quando submetido a um nível elevado de distorção harmônica.

A carga menos susceptível aos efeitos das harmônicas é aquela cuja principal função é o aquecimento (IEEE(1), 1992). Uma vantagem do uso destas cargas é o amortecimento no valor da impedância do sistema para frequências próximas a de ressonância, o que reduz as distorções harmônicas. Por consequência, consumidores com maior porcentagem de cargas resistivas têm os efeitos dos harmônicos menos pronunciados quando comparados às instalações que as possuem em menor proporção.

Em motores, tensões e correntes harmônicas podem causar vibrações audíveis no rotor, afetar o torque desenvolvido (em menor escala), além de reduzir a eficiência do conjunto. Aquecimentos, originados pelo excesso de correntes harmônicas, podem reduzir a vida útil destes equipamentos. Visando prevenir maiores complicações, a distorção total na tensão de alimentação de máquinas rotativas deveria ser limitada a valores inferiores a 5% (ARRILAGA, 2003).

Como motores contribuem para o aumento da potência de curto-circuito local e esta grandeza está profundamente relacionada à frequência de ressonância, a inserção destes equipamentos resulta no deslocamento da frequência de ressonância da barra em análise. Desta forma, caso a nova ressonância esteja ainda mais próxima a uma ordem injetada por fontes harmônicas significativa, a alimentação destes equipamentos pode resultar em um aumento da distorção harmônica na tensão (IEEE(1), 1992).

Apesar de serem as fontes mais significativas de harmônicos, os equipamentos eletrônicos são as cargas mais afetadas por eles. Por necessitarem de tensões senoidais para realização do controle de seu sistema, distorções elevadas (causadas pela presença de harmônicos) podem resultar em um mau funcionamento do equipamento.

Distorções na tensão ou na corrente produzem campos elétricos e magnéticos, que podem interferir significativamente no desempenho da comunicação telefônica. Seu impacto está relacionado às amplitudes e frequências dos componentes harmônicos

(CIVIDINO,1992) e sua eliminação pode ser obtida através da redução da distorção harmônica e/ou da proximidade entre o sistema de potência e o cabo de comunicação.

Em um sistema elétrico, a possibilidade de ressonância é influenciada, principalmente, pela relação entre a reatância dos capacitores e a indutância dos transformadores. Nestes últimos elementos, as correntes harmônicas causam elevações do ruído e dos aquecimentos no núcleo e nos enrolamentos, o que reduz sua capacidade de condução de potência e sua vida útil. Como a reatância destes dispositivos aumenta com a frequência, conforme identificado na equação (2.15), eles se apresentam como uma alta impedância para as frequências mais elevadas, funcionando como um bloqueio para as mesmas.

$$X_L = 2\pi f \times L \quad (2.15)$$

Considerando:

X_L = reatância do transformador (Ohms)

f = frequência (Hertz)

L = indutância (Henry)

Os condutores da instalação também são afetados pelas correntes harmônicas. Segundo (IEEE(1), 1992), cabos envolvidos em situações de ressonâncias podem sofrer falhas na isolação do dielétrico, ao serem submetidos à estresses elétricos e ao efeito corona. Correntes não senoidais ocasionam um aquecimento adicional, o que reduz a capacidade de condução de corrente destes elementos.

2.6 Materiais Típicos de Fabricação dos Capacitores

Capacitores de polipropileno metalizado e impregnados “All Film” são muito utilizados na correção do fator de potência em baixa tensão, possuem como dielétrico o filme de polímero e apresentam boa estabilidade no valor da capacitância com a alteração da tensão e da frequência.

Devido ao seu baixo custo e formato compacto, capacitores de polipropileno metalizado (PPM) são muito utilizados na correção do fator de potência em aplicações de baixa tensão. Dispositivos com esta tecnologia utilizam na sua fabricação eletrodos

metalizados e podem ser impregnados com uma resina enrijecida ou impregnados a óleo, um aprimoramento da técnica para melhorar a dissipação do calor e elevar a rigidez dielétrica do conjunto.

Os capacitores impregnados “All Film” são bastante utilizados na correção do fator de potência em média tensão e possuem, para a condução da corrente, finas camadas de folhas de alumínio. Devido a sua grande robustez, quando é necessária uma maior suportabilidade frente a sobrecorrentes, estes capacitores também são utilizados em aplicações de baixa tensão, principalmente em filtros sintonizados.

As características e os pontos fracos de cada uma destas tecnologias serão apresentadas mais detalhadamente a seguir.

2.6.1 Capacitores de Polipropileno Metalizado (PPM)

Os dispositivos com tecnologia PPM são, geralmente, acondicionados em canecas cilíndricas com as extremidades fixadas através de um material fundido e pulverizado. Há nos capacitores, uma união entre este material, o filme e a fina camada metálica, constituída, geralmente, por alumínio ou pela associação deste material e zinco. No centro do capacitor, as camadas do filme de polipropileno metalizado (dielétricos) são conectadas alternadamente por eletrodos às extremidades opostas, situação apresentada na figura (2.5):

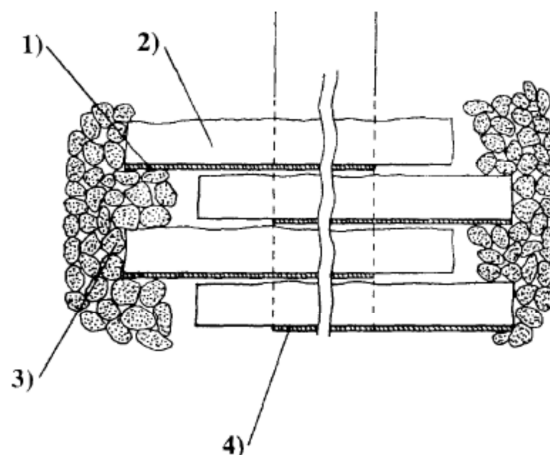


Figura 2.5 Vista esquemática das partes constituintes do capacitor de polipropileno metalizado

Fonte: (NUCCI, 1991)

Elementos constituintes do capacitor PPM, como ilustrado na figura (2.5):

- 1- contato entre a borda das extremidades e o eletrodo
- 2- filme de polipropileno
- 3- borda da extremidade
- 4- eletrodo, constituído por uma fina camada metalizada

Capacitores PPM possuem a capacidade de auto-regeneração quando da ocorrência de defeitos como microfalhas, presença de partículas indesejadas e furos de pequenos diâmetros no filme. Segundo o trabalho de Xin (2000), com a elevação da tensão, estas imperfeições podem gerar rupturas no dielétrico que resultam em descargas da energia armazenada. Durante o processo de auto-regeneração, o filme é perfurado e uma fina camada de metal, vaporizada no local, formando um anel e isolando eletricamente a área defeituosa (evento mostrado na figura (2.6)).

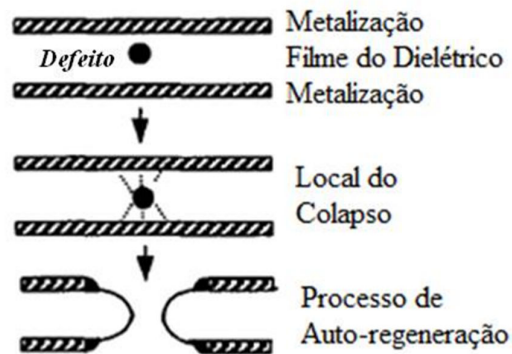


Figura 2.6 Etapas do processo de auto-regeneração do capacitor PPM

Fonte: (XIN, 2000)- figura traduzida

Após o primeiro evento de auto-regeneração, sua capacitância reduz apenas ligeiramente e tensões elevadas poderão ser aplicadas sem causarem perdas de isolamento no capacitor. Um novo processo de auto-regeneração, porém, torna-se mais complicado, uma vez que as camadas adjacentes influenciam muito na formação de um novo colapso.

Um método de avaliação da vida útil destes capacitores consiste no acompanhamento da sua capacitância: um aumento da taxa de redução desta grandeza indica o fim da sua vida (SARJEANT, 1998). Tipicamente, mecanismos internos

atribuem a queima destes capacitores a uma redução de 5% do valor inicial da capacitância.

2.6.2 Impregnação a Óleo de Capacitores de Polipropileno Metalizado (PPM)

A impregnação a óleo de capacitores PPM se mostra uma boa alternativa para aprimoramento das características isolantes destes dispositivos. O processo funciona como um acréscimo da camada isolante e resulta em um aumento da tensão de ruptura e da resistência do eletrodo. O grau de aumento desta resistência é influenciado pela compatibilidade entre o dielétrico e o óleo impregnado, desta forma estudos foram realizados visando à seleção dos óleos isolantes que causem menor alteração do fator de dissipação do capacitor.

Os aumentos da temperatura e do tempo utilizados no processo de impregnação do óleo contribuem para uma melhor difusão entre o filme e o óleo isolante, o que resulta em um aumento significativo da rigidez dielétrica destes dispositivos (SCHNEUWLY, 1998).

2.6.3 Capacitores Impregnados “All-Film”

Os chamados capacitores impregnados “All Film” possuem três componentes básicos: eletrodos, material dielétrico e um fluido entre essas duas camadas. A figura (2.7) identifica as partes constituintes dos dispositivos.

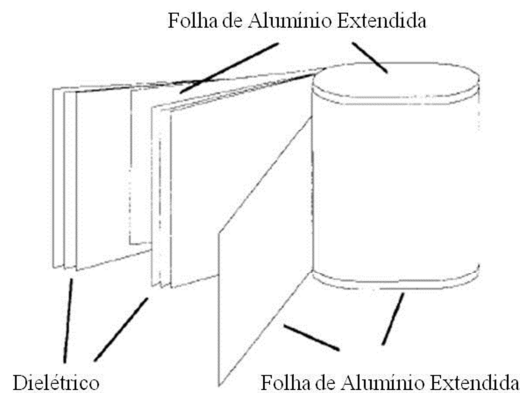


Figura 2.7 Vista esquemática das partes constituintes do capacitor impregnado “All Film”

Fonte: (SARJEANT, 1998)- figura traduzida

O dielétrico mais utilizado nestes capacitores é o polipropileno, enquanto os eletrodos são compostos, geralmente, por folhas de alumínio. A conexão entre os eletrodos é realizada, internamente, através de borrifos de um metal fundido. A vantagem da utilização de folhas de alumínio está relacionada a uma grande capacidade de condução de corrente, sendo estes dispositivos usados em aplicações que demandam valores mais elevados destas grandezas (BOICOURT, 1970). Já o fluido localizado entre as camadas isolantes e os eletrodos tem a função de aumentar a tensão de ruptura do dielétrico e elevar a dissipação de calor do conjunto.

Tipicamente, estes dispositivos são constituídos por elementos capacitivos (formados por finas camadas de polipropileno) instalados em série e em paralelo, visando o aumento tensão a ser aplicada e da capacitância, respectivamente. Caso algum destes elementos sofra uma ruptura, um curto-circuito ocorrerá em seus terminais (conexão através de um baixo valor de resistência). Desta forma, os demais elementos estarão submetidos à mesma tensão inicial e poderão operar sob um estresse elétrico, resultando, possivelmente, em um comprometimento de parte do banco (SARJEANT, 1998), fenômeno chamado de avalanche.

A redução da suportabilidade do sistema isolante do capacitor está relacionada, principalmente, a reação entre o dielétrico sólido e os radicais livres. Segundo abordado por Duarte (2002), a formação destes radicais está vinculada a reações decorrentes da transferência de cargas entre os eletrodos do capacitor e têm a sua origem, provavelmente, em impurezas (como água e oxigênio) ou aditivos no óleo isolante. Como a descarga parcial, causada pelo estresse elétrico, mesmo que pequena, é a responsável pela energia que gera a reação eletroquímica descrita, conclui-se que uma redução no valor da tensão limitaria a produção de radicais livres, diminuindo, por consequência, a probabilidade de queima do capacitor.

Capacitores operando sob elevadas temperaturas elevam ainda mais a sua probabilidade de queima, pois o esforço térmico aumenta o número de reações químicas nos materiais isolantes (SIMONI, 1993).

2.7 Faturamento do Fator de Potência pela Concessionária

No Brasil, a Resolução 414 (ANEEL, 2010), responsável por estabelecer as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, divide as unidades consumidoras

em dois grupos: A e B. O primeiro é composto por unidades com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em rede secundária, e caracterizado pela tarifa binômia, isto é faturamento aplicável ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda. Já o grupo B, alimentado em tensão inferior a 2,3kV, é tarifado apenas a partir do consumo de energia ativa.

No que concerne ao fator de potência, os Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2009) estabelecem que o controle desta grandeza deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória no caso de unidades do grupo A e por medição individual permanente e facultativa nos casos do grupo B, sendo calculado através da razão entre a potência ativa e a raiz da soma quadrática das potências ativa e reativa em 60 Hz, desconsiderando os efeitos causados pelas frequências harmônicas, conforme identificado na equação (2.16). Como o fator utilizado no cálculo do faturamento pelas concessionárias considera as grandezas na frequência fundamental, ele é definido essencialmente como o fator de deslocamento.

$$\text{f. p.} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (2.16)$$

Considerando:

f.p. = fator de potência

P_1 = potência ativa na frequência fundamental (Watts)

Q_1 = potência reativa na frequência fundamental (VAr)

A Resolução Normativa nº 414 (ANEEL, 2010) estabelece que no período de seis horas consecutivas compreendido entre 23h 30min e 6h 30min, serão apenas faturados os fatores de potência (f.p.) capacitivos inferiores a 0,92. No período complementar, serão sobretaxados os valores de f.p. menores que 0,92, porém indutivos. Seguem abaixo as equações utilizadas por (ANEEL, 2010) para faturamento da energia e da demanda de potência reativas excedentes, em ambas o cálculo é realizado em cada intervalo de uma hora:

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[EEAM_T \times \left(\frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad (2.17)$$

$$D_{RE}(p) = \left[\text{MAX}_{T=1}^n \left(\text{PAM}_T \times \frac{f_R}{f_T} \right) - \text{PAF}(p) \right] \times \text{VR}_{DRE} \quad (2.18)$$

E_{RE} = valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência f_R , no período de faturamento, em Reais

$E\text{EMA}_T$ = montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” de uma hora (em MWh)

f_R = fator de potência de referência igual a 0,92

f_T = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo “T” de uma hora, durante o período de faturamento.

VR_{ERE} = valor de referência equivalente à tarifa de energia “TE” da tarifa de fornecimento, em Reais por MWh.

$D_{RE}(p)$ = valor, por posto horário “p”, correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência f_R no período de faturamento, em Reais.

PAM_T = demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de uma hora “T”, durante o período de faturamento, em kW.

$\text{PAF}(p)$ = demanda de potência ativa faturável, em cada posto horário “p” no período de faturamento, em kW.

VR_{DRE} = valor de referência equivalente às tarifas de demanda de potência das tarifas de fornecimento aplicáveis.

MAX = função que identifica o valor máximo da equação, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto horário “p”.

T = indica intervalo de uma hora, no período de faturamento.

p = indica posto horário, ponta ou fora de ponta, para as tarifas horossazonais.

n = número de intervalos de integralização “T”, posto horário “p”, no período de faturamento.

Atualmente no Brasil, os medidores mais utilizados no faturamento da energia elétrica dos consumidores do grupo A são os medidores eletrônicos, porém os trabalhos de Rodrigues (2009) e Suhett (2008) comprovaram que os mesmos apresentam erros na medição do fator de potência quando submetidos a situações com grandes distorções harmônicas.

De acordo com o trabalho de Rodrigues (2009), estes instrumentos possuem filtros que possibilitam a redução da poluição harmônica, porém em situações com alta distorção foram detectados desvios no valor da energia reativa acima dos aceitáveis pelas normas vigentes.

Em sua dissertação, Suhett (2008) alertou para uma falta de padronização na metodologia de medição do fator de potência e da potência reativa, o que pode resultar em uma penalização de forma diferenciada para consumidores de energia com a mesma condição de rede distorcida.

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE CASO

O objetivo deste capítulo é apresentar um estudo de caso real que possui peculiaridades que ajudam no aprofundamento do conhecimento do tema. O estudo de caso deste trabalho é analisado com foco nas causas dos problemas de queimas de capacitores verificadas no local. Ao final, são discutidos os dados obtidos a partir de medições na entrada dos conversores de frequência instalados na indústria, que contribuem para a avaliação global do problema em questão.

3.1 Sistema Elétrico em Estudo

Foi escolhida para estudo, uma indústria que possui como atividade principal a mineração e está instalada em um barramento com baixa potência de curto-circuito (6,6 MVA). Esta se encontra localizada no final da rede de distribuição, apresentando, como consequência, grande vulnerabilidade frente a distúrbios elétricos.

A alimentação do sistema é provida através de uma rede com tensão de linha de 13,8kV e transformadores com primários em delta, cujos secundários estão em nível de 440V com configuração estrela e neutro solidamente aterrado.

A indústria foi recentemente alvo de ampliação, mas antes desta tinha uma potência instalada em cargas de 800kVA, dividida em dois transformadores de 300 e 500 kVA. Os dois equipamentos eram responsáveis pela alimentação de cargas motoras, porém o transformador de maior potência alimentava o CCM-1 (Centro de Controle de Motores-1), que possuía em seu quadro apenas 11% de cargas geradoras de harmônicos (dois inversores, um de 7,5cv e outro de 30cv). Como o uso de cargas não lineares pela indústria era pequeno, o sistema operava sem eventos de queimas nos capacitores utilizados para a correção do fator de potência.

Com o aumento do consumo de *commodities*, no início deste século, a empresa decidiu dobrar a sua demanda, instalando dois novos transformadores, de 300 e 500 kVA, para alimentação dos novos maquinários adquiridos.

O novo transformador de 500 kVA alimenta o CCM-2, onde existem cargas motoras e cinco conversores de frequência com potências que variam entre 50 e 150 cv, somando uma proporção bastante considerável de 65% de cargas não lineares. O

transformador de 300 kVA alimenta apenas a bomba de recirculação, com partida através de chave “*soft-starter*”.

Após a aquisição dos novos equipamentos, a potência instalada da mineradora passou a ser de 1,6 MVA, sendo que os dois transformadores de 500 kVA estão próximos ao ponto de entrega da energia e os dois de 300 kVA estão localizados a mais de 300m deste local e possuem bancos de 35 e 65 kVAr para a correção do fator de potência.

A implantação do novo sistema de produção foi concluída no ano de 2009 e desde então freqüentes queimas nos bancos de capacitores utilizados na correção do fator de potência dos CCM’s 1 e 2 têm sido verificadas. Apesar dos dois transformadores de 300 kVA possuírem capacitores com esta mesma função, seus dispositivos não apresentaram tais problemas.

A figura (3.1) identifica o diagrama unifilar simplificado da instalação:

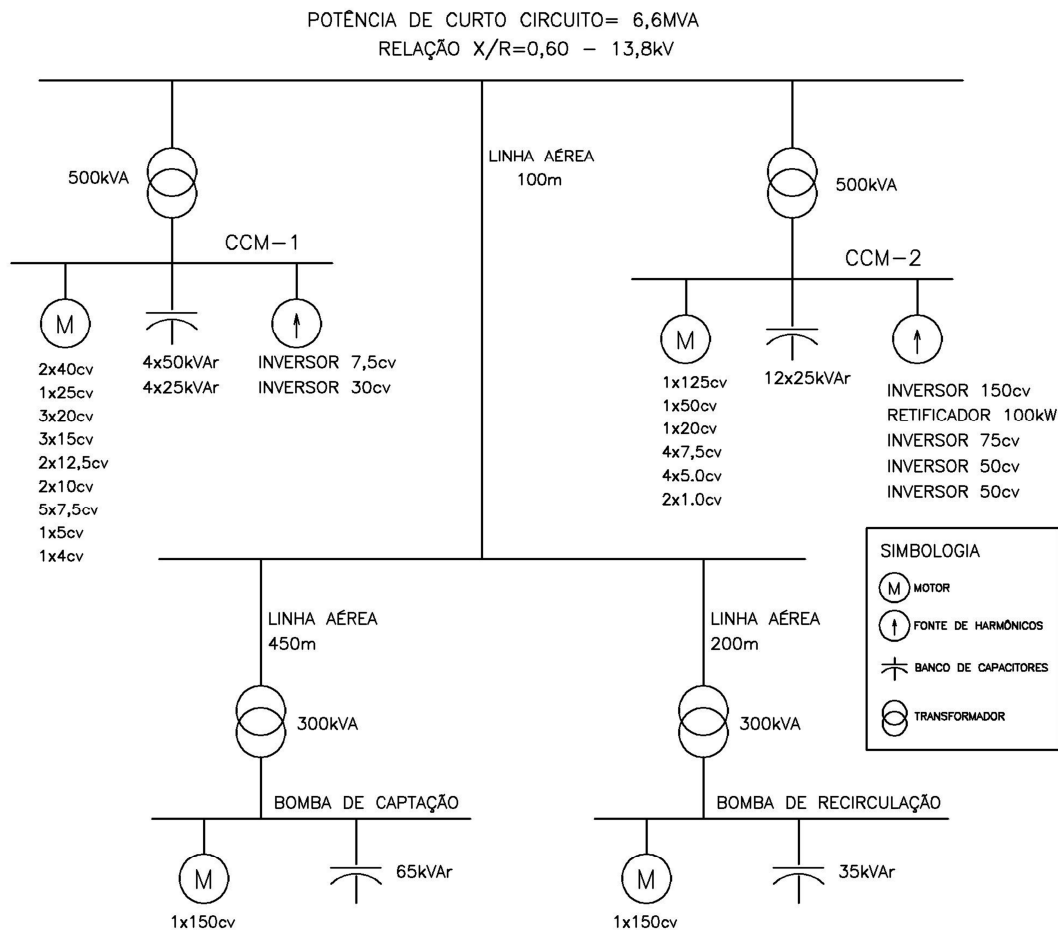


Figura 3.1 Diagrama unifilar simplificado da instalação

3.2 Características dos Bancos de Capacitores Danificados

A correção do fator de potência nos dois CCM's é realizada de forma automática e com potência reativa total de 300kVAr em cada uma das barras, divididas em quatro estágios de 25kVAr e quatro de 50kVAr, para o CCM-1 e doze estágios de 25kVAr, para o CCM-2. Os capacitores são de polipropileno metalizado (PPM), tecnologia largamente utilizada em aplicações de baixa tensão na correção do fator de potência de consumidores industriais e comerciais.

Os capacitores utilizados na compensação reativa das duas barras são trifásicos, conectados em delta e possuem frequências e tensões nominais de 60Hz e 440V, grandezas iguais à do sistema. Os dispositivos, identificados na figura (3.2), são acondicionados em canecas de alumínio cilíndricas, impregnados com uma resina enrijecida e produzidos pela Siemens (modelo Phicap-Epcos).



Figura 3.2 Capacitores Epcos da Siemens utilizados na correção do fator de potência dos CCM's 1 e 2

O controlador automático utilizado na correção do fator de potência dos CCM's, apresentado na figura (3.3), é fabricado pela IMS (modelo Cap 485) e permite o controle da potência reativa da barra utilizando bancos de capacitores com até 12 estágios. O equipamento supervisiona as grandezas da rede e envia o comando para a energização dos capacitores para a correção do fator de potência da instalação para o valor desejado, programado no controlador pelo usuário.



Figura 3.3 Controlador automático utilizado na correção do fator de potência dos CCM's 1 e 2

3.3 Análise das Queimas dos Capacitores dos CCM's

Visando à avaliação dos eventos de queimas dos capacitores, medições foram realizadas na entrada dos bancos de capacitores dos dois CCM's. Os resultados obtidos são identificados nas figuras (3.4) e (3.5) e tabela (3.1). Um resumo dos níveis admissíveis e tolerâncias estabelecidos pela norma NBR IEC 60831-1 e seguidos pelo fabricante dos capacitores (Siemens) são relacionados na tabela (3.2):

Tabela 3.1 Grandezas obtidas nas medições dos capacitores dos CCM's 1 e 2

Local da medição	THD _v (%)	THD _i (%)
Banco de capacitores do CCM-1	8,7	77,5
Banco de capacitores do CCM-2	10,8	89,9

Tabela 3.2 Níveis admissíveis e tolerâncias para capacitores auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão máxima de 1000V

Grandezas	Limites	Duração máxima
Tolerância da capacitância (C_N) para capacitores até 100kVAr	Não pode diferir da capacitância nominal em mais que: - 5% a + 10%	-
Tensão máxima de longa duração admitida	1,10 x Tensão nominal eficaz	8h a cada 24 h
Máxima corrente admitida (considerando sobretensões, harmônicas e desconsiderando a tolerância de C_N)	1,3 x Corrente correspondente nas tensão senoidal e frequência nominais (excetuando-se regimes transitórios)	Funcionamento Permanente
Máxima corrente admitida (considerando sobretensões, harmônicas e a tolerância da capacitância de 1,15 C_N)	1,5 x Corrente correspondente nas tensão senoidal e frequência nominais (excetuando-se regimes transitórios)	Funcionamento Permanente

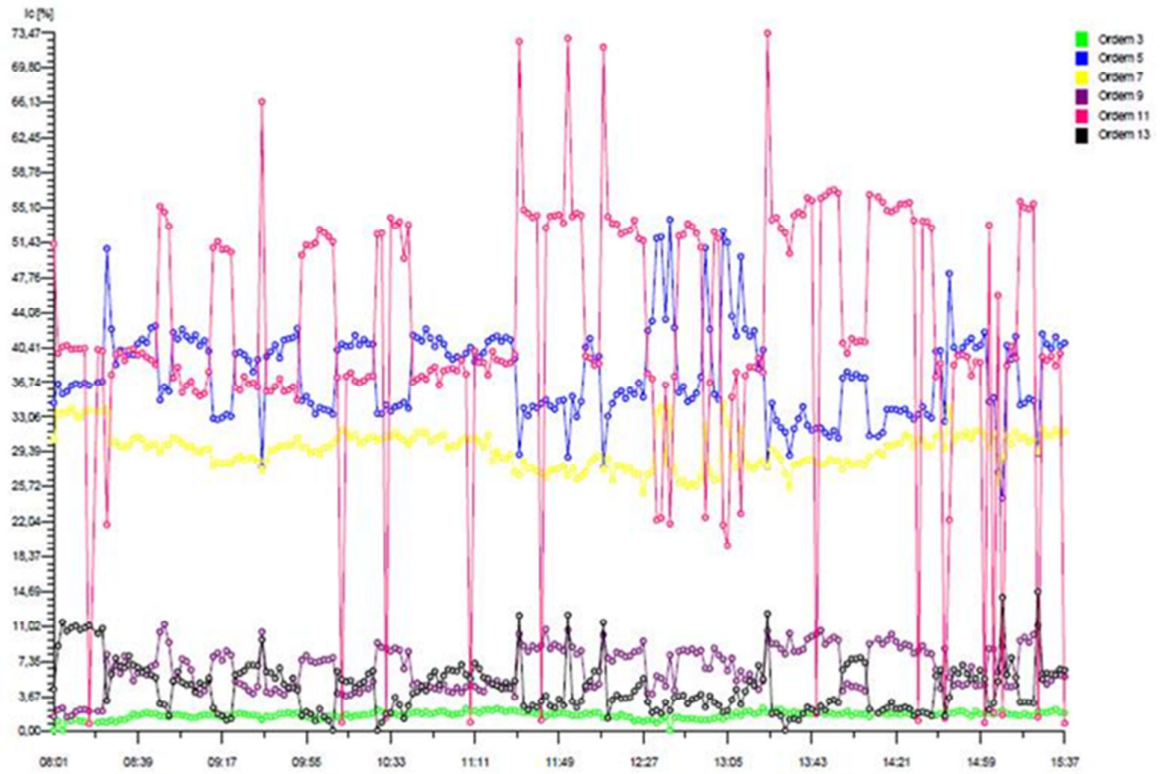


Figura 3.4 Distorção harmônica na corrente verificada no banco de capacitores do CCM-1

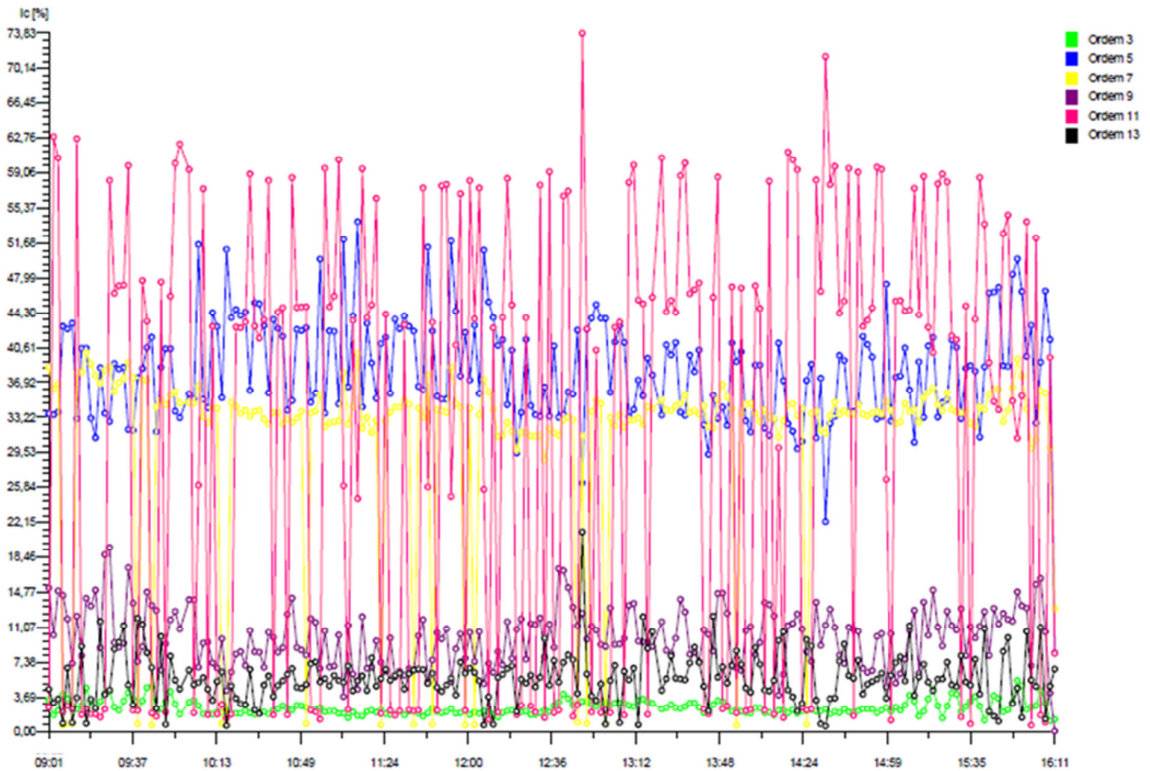


Figura 3.5 Distorção harmônica na corrente obtida na medição do banco de capacitores do CCM-2

Distorções harmônicas aumentam as tensões e as correntes às quais os capacitores são submetidos. Como a reatância dos capacitores reduz com o aumento da frequência, ele se torna um dreno para as correntes de ordens harmônicas mais elevadas, o que pode resultar em redução da sua vida útil.

Considerando os resultados da medição e as limitações de capacitores PPM, identificadas nas tabelas (3.1) e (3.2), respectivamente, conclui-se que as distorções harmônicas são bastante elevadas, porém que a principal causa para a queima precoce foi o excesso de corrente que atravessa os dispositivos. Pode-se concluir também que o estresse elétrico pouco contribuiu para a queima dos dispositivos, uma vez que o valor de crista da tensão a que os capacitores foram submetidos não estava acima da tensão nominal destes elementos.

3.3.1 Explicação Técnica para a Queima dos Capacitores

Normalmente, a principal causa de queimas de capacitores PPM está relacionada ao descolamento entre os eletrodos e as bordas destes elementos. Segundo Nucci (1991), as causas para tal ainda são desconhecidas, porém é razoável atribuí-las à estresses térmicos, elétricos e mecânicos.

Conforme equação (3.1), a corrente que atravessa os capacitores é diretamente proporcional à taxa de variação da tensão aplicada em seus terminais e alterações bruscas nesta grandeza ocasionam picos elevados de correntes. Devido ao efeito Joule na resistência de contato entre as bordas e os eletrodos, estes pulsos podem resultar em uma elevação da temperatura local.

$$i(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Onde:

i = valor da corrente (Ampères)

t = tempo (segundos)

C = capacitância (Farad)

V = tensão aplicada nos terminais do capacitor (Volts)

O estresse térmico é o mais pronunciado em capacitores com tecnologia PPM e segundo Teixeira (2007), a redução da vida útil está profundamente relacionada ao “aumento das reações químicas nos materiais isolantes”.

Nucci (1991) porém alerta que estresses mecânicos, causados pela combinação das forças de Coulomb e eletrodinâmica entre os eletrodos, e elétricos não podem ser negligenciados no diagnóstico da falha de capacitores com tecnologia PPM. O estresse de natureza elétrica é resultado de pulsos de tensão entre os terminais dos capacitores, que geram descargas parciais, corrente de fuga entre as placas, no dielétrico. Nestes capacitores, descargas parciais contribuem para a redução da capacitância, geram gases internamente e causam a degradação do contato entre as bordas e os eletrodos.

3.3.2 Outras Características dos Capacitores Verificadas em Campo

Apesar de freqüentemente apresentarem envelhecimentos prematuros em seus dielétricos, devido à sobretemperatura, capacitores com tecnologia PPM são conhecidos por uma boa estabilidade em seu desempenho, por serem os únicos com a segurança de abrir o circuito após a sua queima, não causando um curto-circuito (SARJEANT, 1998). Esta característica reduz o risco de ocorrência de uma chama incendiária e foi observada no caso em estudo, uma vez a queima de vários dispositivos não resultou em curtos-circuitos na instalação elétrica. Curtos-circuitos em capacitores PPM são verificados apenas caso ocorram variações bruscas em sua tensão de alimentação (da ordem de kV).

Conforme mencionado no item 2.6.1, capacitores PPM apresentam reduções significativas na capacitância no final da vida útil e, tipicamente, mecanismos internos atribuem a queima a uma redução de 5% no valor inicial da capacitância. Em campo, esta característica possibilitou uma previsão da queima e substituição dos dispositivos.

3.4 Potência Reativa Injetada no Sistema

Os controladores automáticos estavam programados para manterem o fator de potência unitário nas duas barras e durante a medição foram identificadas que as potências reativas demandadas pelo CCM-1 variaram entre 200 e 225 kVAr, enquanto as do CCM-2, entre 100 e 125 kVAr. As medições foram realizadas com o analisador de qualidade de energia da Embrasul, modelo RE-6000.

3.5 Medição da Distorção Harmônica nos CCM's

Após a constatação de que as causas para as freqüentes queimas dos bancos de capacitores são as elevadas distorções harmônicas, a próxima etapa consistiu em medições nos dois CCM's.

As figuras (3.6) e (3.7) mostram os conteúdos harmônicos obtidos nas tensões dos CCM's 1 e 2, respectivamente, enquanto as tabelas (3.3) e (3.4) relacionam os níveis de referência para distorções harmônicas totais e individuais na tensão estabelecidos pelo módulo 8 do Procedimento de Distribuição (ANEEL, 2009). Visando a uma melhor visualização do conteúdo dos gráficos, optou-se pela análise em apenas um período da medição realizada.

Tabela 3.3 Níveis de referência para distorções harmônicas totais na tensão

Fonte: (ANEEL, 2009)

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 138kV$	3

Tabela 3.4 Níveis de referência para distorções harmônicas individuais na tensão

Fonte: (ANEEL, 2009)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13.8 \text{ kV}$	$13.8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	2.5	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
	>25	1.5	1	1	0.5
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	6	1	0.5	0.5	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

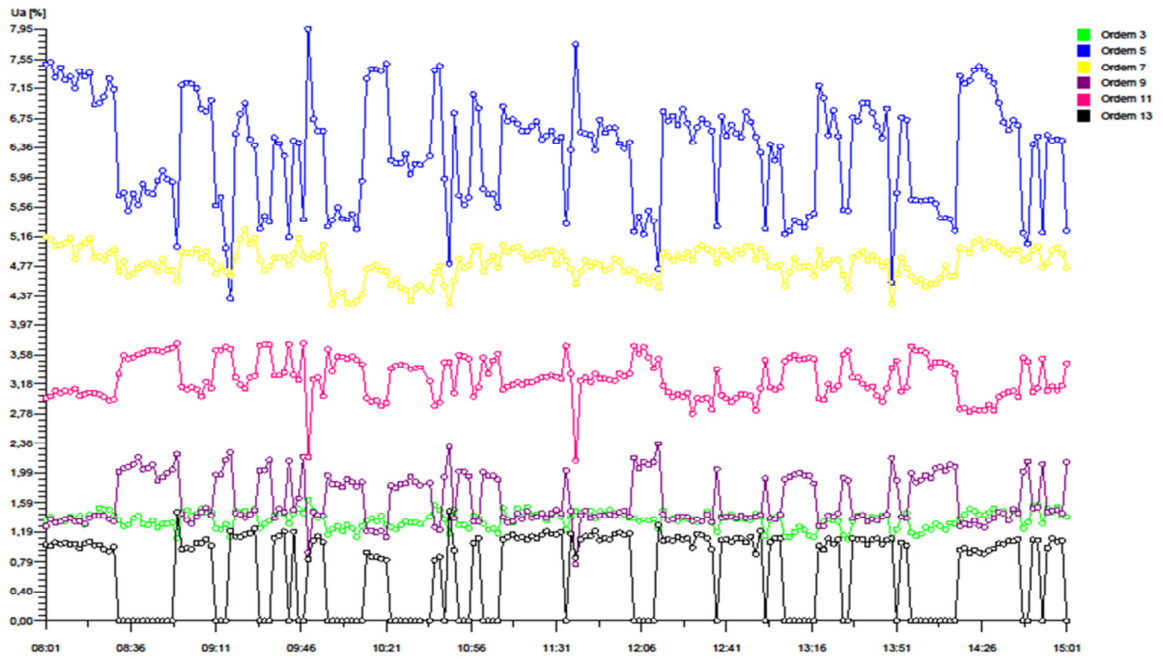


Figura 3.6 Ocorrência de harmônicas de tensão no CCM-1

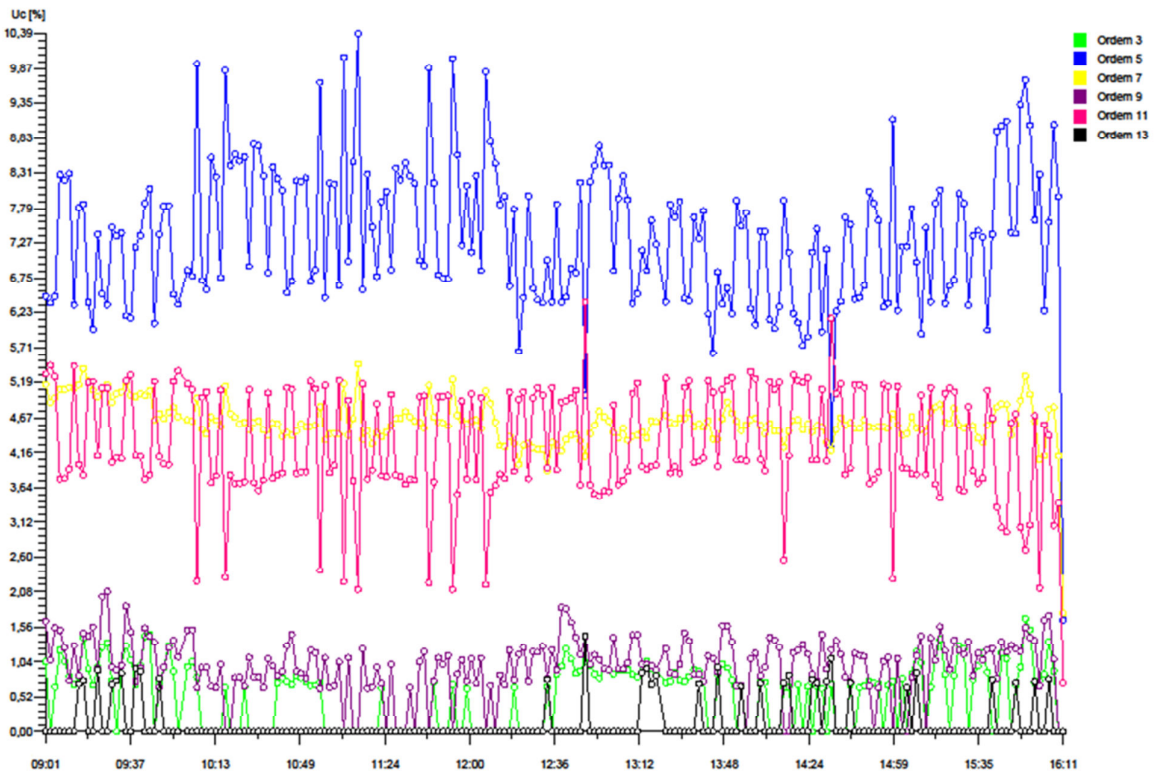


Figura 3.7 Ocorrência de harmônicas de tensão no CCM-2

A partir das medições, identificam-se que as distorções totais na tensão encontradas nos CCM's 1 e 2 foram de 8,6% e 11%, respectivamente, valores acima de 8%, nível de referência estabelecido para consumidores com tensão de alimentação de 13,8kV pelo módulo 8 do Procedimento de Distribuição.

As figuras (3.6) e (3.7) revelam que os limites de distorções harmônicas individuais na tensão foram ultrapassados nas quinta e décima primeira ordens nos dois CCM's, sendo que para as sétima e nona ordens, os valores só foram ultrapassados no CCM-1.

A figura (3.6) apresenta uma distorção na tensão no CCM-1 significativa para ordens menores típicas de instalações com a presença de conversores de frequência de seis pulsos: de quinto e sétimo harmônicos, de aproximadamente 6,4% e 5,1%, respectivamente. Harmônicos característicos de ordens mais elevadas também foram verificados, porém com módulos menores, sendo de 3,3% para a décima primeira e de 1% para a décima terceira ordem. O gráfico revela distorções de ordem tripla, sendo de 1,3% para o terceiro harmônico e de 1,8% para o nono.

A medição na tensão do CCM-2, apresentada na figura (3.7), também mostra distorções em ordens típicas de sistemas com a presença de conversores de seis pulsos. As distorções para quinta, sétima e décima primeira ordens foram de 7,8%, 4,9% e 4,7%. Assim como no CCM-1, nesta barra foram encontrados harmônicos de ordem tripla de aproximadamente 1% e 1,3% para o terceiro e nono harmônicos, respectivamente.

As duas medições não revelaram a existência de harmônicos pares na tensão.

3.6 Medição das Correntes Harmônicas Injetadas

Os valores de componentes harmônicos injetados na rede por conversores estáticos são, geralmente, fornecidos por seus fabricantes, porém, tomam normalmente como referência tensões de alimentação consideradas puramente senoidais. Quando a tensão é distorcida, pode-se alterar sensivelmente o espectro harmônico emitido por estes equipamentos e os índices de distorção verificados atingem valores elevados. Optou-se, neste trabalho, por medições na entrada de todos os sete conversores (desde o inversor de 7,5cv até o equipamento de 150cv). A partir destas medições, outras características como: carregamento, fator de deslocamento e funcionamento dos equipamentos também são analisadas.

Para efeitos de análise e comparação, a tabela (3.5) relaciona os valores de correntes harmônicas até a décima terceira ordem fornecidos pelo fabricante do retificador de 100 kW, enquanto a tabela (3.6) e a figura (3.8) apresentam os valores das amplitudes das harmônicas de ordem ímpar obtidos pelas medições efetuadas nestes equipamentos.

Tabela 3.5 Espectro harmônico típico fornecido pelo fabricante do retificador de 100kW

Ordem Harmônica	Magnitude
5	31,8%
7	9,1%
11	6,4%
13	3,3%

Tabela 3.6 Espectro harmônico de ordem ímpar da corrente medido no retificador de 100kW

Ordem Harmônica	Magnitude
3	5%
5	40%
7	4,8%
9	4%
11	21,5%
13	8,3%
15	3,3%

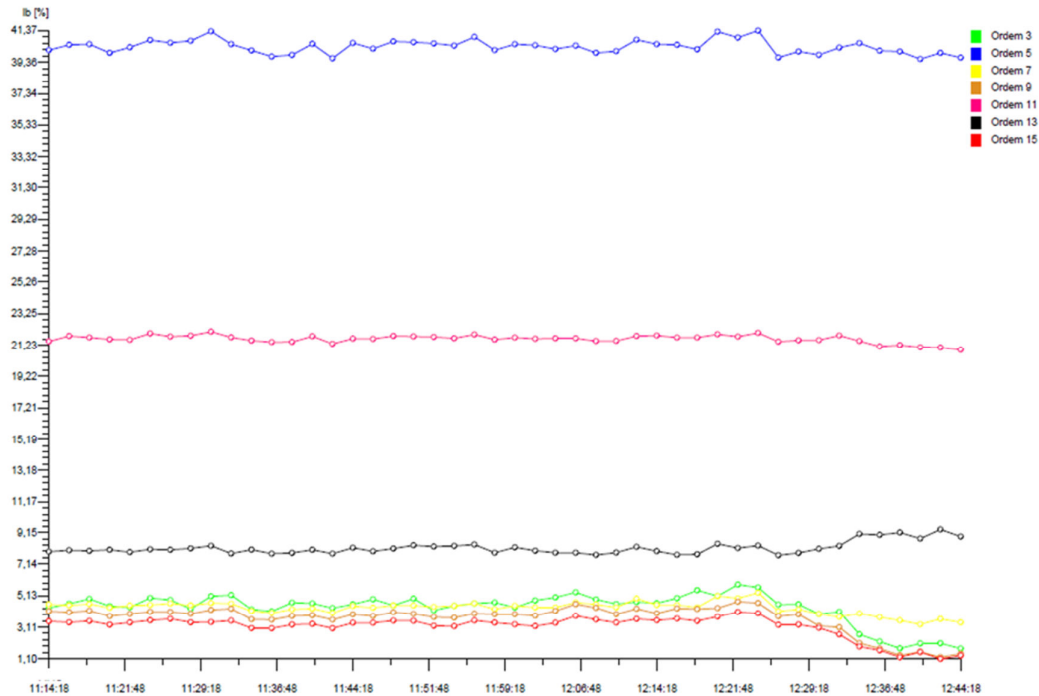


Figura 3.8 Espectro harmônico de ordens ímpares medido na corrente do retificador de 100kW

Nas medições realizadas na entrada dos conversores, os módulos dos harmônicos característicos encontrados (5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens) foram diferentes dos valores típicos fornecidos pelos fabricantes. No caso do retificador de 100 kW, os valores medidos para 5^a, 11^a e 13^a ordens foram superiores aos fornecidos, enquanto o módulo da 7^a ordem foi inferior. Harmônicos triplos (terceira, nona e décima quinta ordens) são não característicos e também foram encontrados. Desta forma, essas medições possibilitarão um modelamento do sistema mais próximo do real.

A análise do espectro mostra que retificadores de seis pulsos geram apenas harmônicos característicos (5^a, 7^a, 11^a, 13^a ordens, etc). Porém, o ângulo de disparo e a sincronização com a tensão na frequência fundamental podem ser afetados pela tensão de alimentação distorcida por harmônicos e por imperfeições no sistema elétrico, incluindo o desbalanceamento da tensão nas três fases e tolerâncias nos valores dos reatores de comutação e no transformador, o que resulta na geração de harmônicos não característicos como os de ordens tripla e par (BUDDINGH, 2003). Irregularidades no controle do equipamento também podem gerar harmônicos não característicos.

Nas medições, foram verificados desequilíbrios consideráveis entre as tensões das três fases nas barras dos CCM's. As equações (3.2) e (3.3) revelam os cálculos utilizando o módulo 8 do PRODIST na quantificação do desequilíbrio da tensão nos

barramentos do sistema de distribuição. A tabela (3.7) identifica os valores de tensões de linha das barras obtidos a partir da medição.

$$FD\% = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (3.2)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3.3)$$

Tabela 3.7 Valores das tensões de linha das barras obtidas a partir da medição

Grandeza	Valor medido (Volts)
V_{ab}	410,6
V_{bc}	429,8
V_{ca}	426,4

Sendo:

FD%- fator de desequilíbrio entre as tensões das fases (%)

V_{ab} - tensão entre as fases “a” e “b” (Volts)

V_{bc} - tensão entre as fases “b” e “c” (Volts)

V_{ca} - tensão entre as fases “c” e “a” (Volts)

A substituição dos valores das tensões medidas, identificadas na tabela (3.7), nas equações (3.2) e (3.3) revela que o desequilíbrio nesta grandeza de 2,8% é superior a 2%, nível de referência estabelecido pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2009).

Desta forma, no estudo em questão, a causa mais provável para a identificação de harmônicos de ordens triplas é o grande desequilíbrio entre as tensões nas três fases. Como o mesmo problema foi verificado quando os equipamentos da mineradora estavam fora de operação, situação sem carga, e a maioria das cargas é trifásica e equilibrada, exceto algumas tomadas e lâmpadas de potências desprezíveis para o estudo, conclui-se que o desbalanceamento não é causado por problemas internos a instalação elétrica, mas sim por um desequilíbrio entre as fases da tensão de alimentação da mineradora.

Em um sistema elétrico balanceado, harmônicos de ordens triplas se comportam como componentes de sequência zero, isto é, tensões e correntes se somam no neutro e estão em fase. Os primários dos transformadores (delta-estrela) se apresentam como impedâncias de valor elevado para as correntes de sequência zero, bloqueando-as.

O resultado do desbalanceamento das tensões é a introdução de um deslocamento de fase entre os componentes dos harmônicos de ordens triplas nos condutores (SIMPSON, 2004). Desta forma, estes harmônicos não se comportarão mais como componentes puros de sequência zero e deverão ser decompostos, também, nas sequências positiva e negativa. Nestas circunstâncias, apenas os componentes de sequência zero serão bloqueados para o lado delta do transformador e a presença de harmônicos de ordens triplas será verificada na média tensão. Este é o caso da mineradora, caso fossem realizadas medições em 13,8 kV (lado de delta dos transformadores), a presença dos harmônicos de ordens triplas seria verificada.

A medição identificou, também, a existência de outros harmônicos não característicos: os de ordens pares, apresentados na figura (3.9). Em retificadores de seis pulsos, irregularidades no ângulo de disparo podem gerar ondas de correntes com semi-ciclos assimétricos, injetando, por consequência, harmônicos de ordens pares no sistema (BUDDINGH, 2003). O motivo para tais observações está relacionado, principalmente, ao alto índice de distorção harmônica na tensão de alimentação dos equipamentos e, apesar dos valores percentuais dos harmônicos ordens pares serem baixos, inferiores a 2%, eles necessitam ser monitorados, já que constituem em indicativos de mau funcionamento do equipamento.

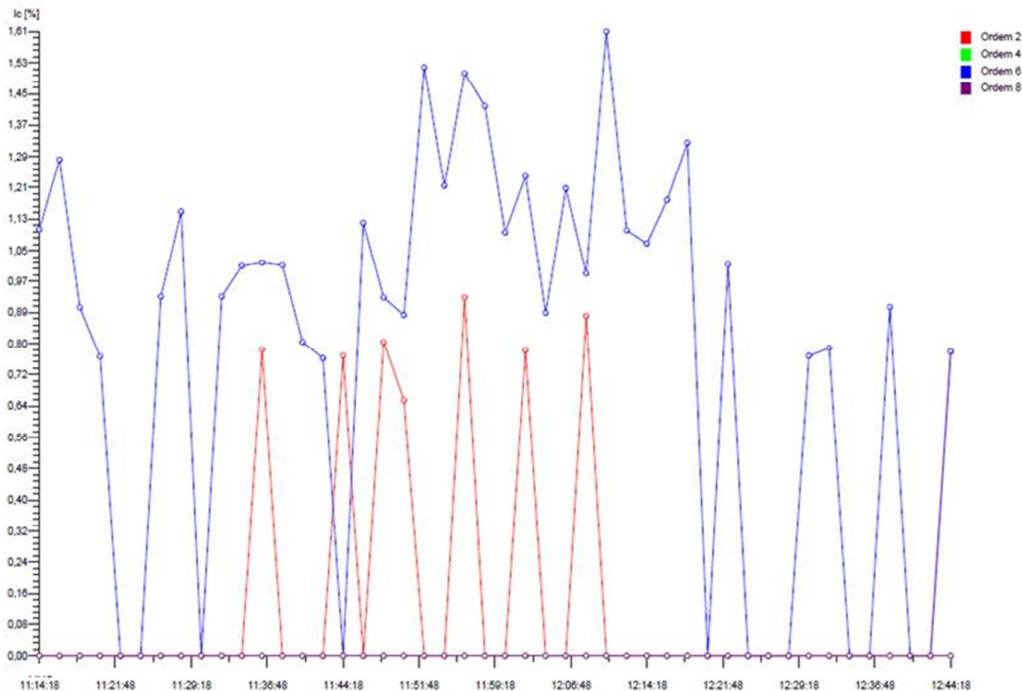


Figura 3.9 Espectro harmônico de ordens pares verificado na corrente do retificador de 100kW

Ao identificar o módulo dos harmônicos não característicos injetados pelos conversores no sistema, a medição na entrada dos equipamentos se mostra uma ferramenta bastante importante na modelagem das cargas não lineares. Caso os projetos de filtros de harmônicos fossem baseados apenas no espectro fornecido pelos fabricantes dos conversores, os harmônicos pares e triplos não serão considerados e uma sobrecarga em seus componentes, devido a essas componentes não esperadas, poderá ocorrer. Na maioria dos casos, porém, a distorção causada por harmônicos não característicos é mínima e não oferece riscos reais de queimas de filtros.

Outra razão para se medir as correntes injetadas no sistema pelos conversores é a identificação dos valores reais dos harmônicos característicos, uma vez que os módulos medidos poderão ser mais elevados que os empíricos (caso verificado no estudo), o que pode prevenir a queima dos componentes dos filtros.

3.7 Conclusão

Este capítulo apresentou o sistema elétrico da indústria em estudo, discutiu as características dos capacitores e identificou que a causa das queimas precoces dos dispositivos foi o estresse térmico. As distorções harmônicas totais e individuais obtidas

nas medições das duas barras do sistema foram analisadas e se mostraram bastante elevadas quando comparadas aos níveis de referência estabelecidos pelo PRODIST.

Normalmente, conversores de frequência injetam harmônicos não característicos no sistema elétrico, porém com módulos desprezíveis. No caso em estudo, a medição realizada na entrada dos conversores permitiu a detecção de harmônicos de ordem tripla com módulos consideráveis, sendo os mesmos resultados do alto nível de distorção harmônica e do grande desequilíbrio na tensão de alimentação dos equipamentos. Também foram identificados harmônicos de ordens pares, porém com módulos desprezíveis.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta as modelagens utilizadas na representação das principais cargas do sistema elétrico no programa de harmônicos (Superharm), calcula as potências reativas necessárias para a correção do fator de potência dos CCM's 1 e 2 e verifica os riscos da instalação de capacitores convencionais nos mesmos. São verificadas as influências que a potência de curto-circuito e a relação X/R da impedância da rede de alimentação exercem na impedância e nas distorções das barras do sistema em análise.

São discutidas soluções como a instalação de um filtro ativo, multiplicação de fases e aumento da potência de curto-circuito da instalação com o objetivo de mitigar os elevados níveis de distorções harmônicas identificados na indústria em análise. É analisado o desempenho do filtro sintonizado do CCM-2, alternativa que apresentou o melhor custo-benefício na mitigação das distorções harmônicas, bem como as características e as tecnologias dos elementos do equipamento. Adicionalmente, é verificada a influência que a distribuição de capacitores em ramificações próximas exerce na barra em análise.

4.1 Frequências de Ressonância do Sistema

Um método prático, porém aproximado para determinação da frequência de ressonância nas barras de um sistema elétrico consiste na obtenção da razão entre a potência de curto-circuito do sistema no ponto de conexão dos capacitores e a potência do banco, identificada na equação (4.1). Neste modelo, a potência de curto-circuito da rede de alimentação é aproximada pela potência de curto-circuito do transformador que alimenta o consumidor.

$$h = \sqrt{\frac{(S_{\text{trafo}}/Z_{\text{trafo}})}{Q_{\text{capacitor}}}} \quad (4.1)$$

Considerando:

h = ordem harmônica em que a ressonância ocorre (p.u.)

S_{trafo} = potência nominal do transformador (em kVA)

Z_{trafo} = impedância do transformador (em p.u.)

$Q_{\text{capacitor}}$ = potência reativa do banco de capacitores (kVAr)

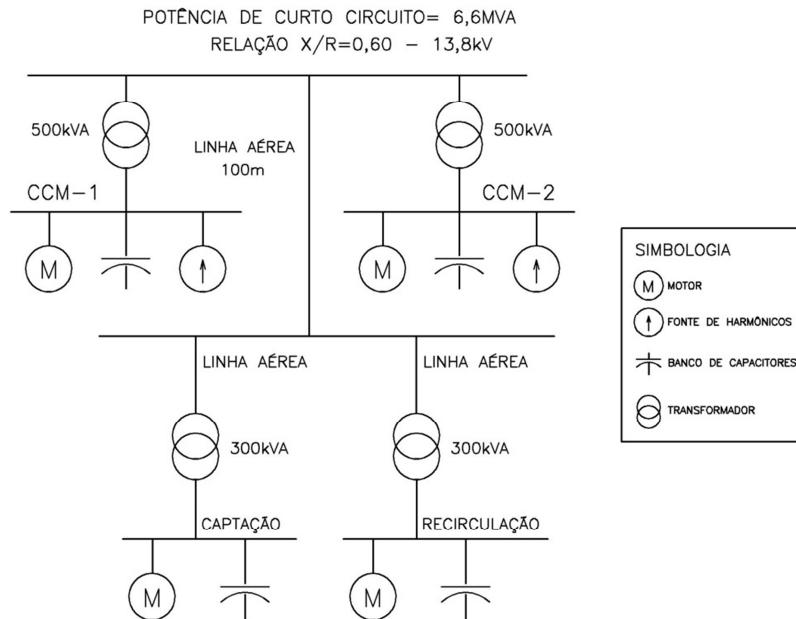
Segundo o guia IEEE Std 519-1992, em locais onde exista um grande número de capacitores em barras próximas, podem existir várias frequências de ressonância e nestes sistemas elétricos interconectados, a equação (4.1) não consegue expressar com precisão a complexidade do problema.

Quando na proximidade da barra em análise, há apenas um banco de capacitores responsável pela compensação reativa, existirá somente uma frequência de ressonância e caso esta esteja próxima das ordens geradas pelas cargas não lineares, distorções harmônicas bastante severas podem ser verificadas. A distribuição de capacitores em barras próximas reduz o potencial de uma ressonância mais grave, a partir da existência de várias frequências de ressonância de módulos menores, o que, porém, aumenta a complexidade do sistema.

Como o sistema elétrico da mineradora é interconectado, possuindo várias barras internas de distribuição, todos os capacitores responsáveis pelas correções dos fatores de potência nos quatro transformadores devem ser considerados e simulações são necessárias para a obtenção das distorções harmônicas e escaneamentos das impedâncias pela frequência nas barras do sistema.

4.2 Modelagem do Sistema Elétrico da Indústria

A análise do sistema elétrico da indústria é realizada através do software Superharm, que é um programa de simulação de harmônicos que possibilita a identificação da distorção harmônica e do escaneamento da impedância pela frequência em todas as barras do sistema. Para a modelagem do sistema é feita a identificação dos dados de entrada do programa, que estão associados às principais cargas, à impedância da concessionária, aos transformadores, aos capacitores e às cargas não lineares. Visando facilitar a visualização do sistema modelado, a figura (4.1) apresenta o diagrama unifilar simplificado das instalações.



A impedância de entrada da subestação ou de curto-circuito do sistema foi representada pelos módulos e relações X/R (razão entre a impedância indutiva e a resistência) das potências de curto-circuito trifásica e fase-terra, que foram fornecidas pela concessionária local (CEMIG). No programa de harmônicos, a impedância do sistema elétrico foi modelada através das impedâncias indutivas e das resistências de seqüências zero e positiva, sendo que foi assumido que apenas o parâmetro indutivo varia linearmente com a frequência e a resistência do sistema não tem o seu valor alterado, uma simplificação razoável para o sistema em análise.

No ponto comum de acoplamento, a relação X/R é de 0,60 e a potência de curto-circuito trifásica da indústria é de 6,62MVA. Desta forma, a instalação apresenta uma baixa razão de curto-circuito (de 4,1), definida como o quociente entre a potência de curto-circuito e a potência instalada, como consequência o sistema elétrico se mostra bastante vulnerável a distúrbios elétricos (harmônicos e variações de tensão), uma vez que a rede não é capaz de absorver os fenômenos envolvidos. Já o módulo reduzido da relação X/R da impedância de curto-circuito está relacionado ao fato do consumidor ser alimentado por condutores de pequena bitola.

Os principais dados dos quatro transformadores, potência, tensões primária e secundária, configurações (delta ou estrela), valor da impedância e relação X/R foram

coletados em campo. Na modelagem, foi considerado que apenas os parâmetros indutivos dos transformadores variam com a frequência.

Os principais alimentadores internos à indústria foram modelados a partir da bitola e do comprimento e representados considerando a resistência e a impedância indutiva de sequência positiva (foi estabelecido que apenas este último parâmetro varia com a frequência).

Os dados principais de todos os motores como potência e tensão nominais, número de pares de pólos, fator de potência foram obtidos na planta. Os motores foram modelados a partir do modelo de rotor bloqueado, uma vez que para os campos magnéticos criados pelos harmônicos o escorregamento é próximo de um e o motor se comporta como se estivesse bloqueado. Os parâmetros calculados pelo programa Superharm são baseados no artigo “*Studies on Modeling of Harmonic Impedance for Induction Motor*” de Zhang Jing e He Fengreng.

As formas de conexão, potências reativas e tensões nominais dos capacitores da instalação foram identificadas. Como a correção do fator de potência nos barramentos dos CCM's 1 e 2 é realizada de forma automática, as potências mais usuais adquiridas na medição são consideradas na simulação.

As cargas não lineares foram modeladas a partir do espectro harmônico e do carregamento obtidos através das medições realizadas na entrada dos equipamentos. Na modelagem, os ângulos de cada ordem harmônica foram considerados para o adequado cancelamento das correntes harmônicas. Como o analisador de qualidade de energia utilizado na medição tem como referência o ângulo da tensão de alimentação (caso usual de instrumentos que monitoram tensões e correntes simultaneamente), conforme instrução do programa Superharm, foi necessária a correção manual do ângulo de cada ordem harmônica, realizada de acordo com a equação (4.2):

$$\theta_h = \theta_{hMED} + h \times \theta_{V1} \quad (4.2)$$

sendo:

h = ordem harmônica

θ_h = ângulo a ser considerado nos dados de entrada do programa Superharm (graus)

θ_{hMED} = ângulo medido em cada ordem harmônica (graus)

θ_{V1} = ângulo medido na tensão fundamental (graus)

As medições foram realizadas com o sistema elétrico em carregamento nominal, pois a informação obtida pela operação das máquinas da empresa indica que todos os equipamentos estavam operando normalmente nos dias em que as medições foram realizadas.

Em sistemas elétricos com tensões, impedâncias e cargas praticamente equilibradas, modelos de sequência positiva (monofásicos) podem ser aplicados na análise da resposta em frequência. Na mineradora, há um desequilíbrio significativo na tensão de alimentação, assim o sistema deve ser representado através de um modelo trifásico, apesar do equilíbrio nas impedâncias internas.

4.3 Validação da Modelagem do Sistema

Com o objetivo de validar a modelagem do sistema elétrico utilizada no programa de simulações, descrita no item anterior, procede-se adquirir o espectro harmônico absorvido pelo filtro sintonizado na 4,8ª ordem harmônica instalado atualmente na indústria, através do multimedidor de grandezas localizado no painel do equipamento. Os dados coletados em campo e os resultados obtidos através da simulação são apresentados na tabela (4.1):

Tabela 4.1 Espectro harmônico da corrente absorvida pelo filtro sintonizado coletado em campo

Ordem	Espectro harmônico coletado em campo	Espectro harmônico obtido na simulação
3	2	0,1
5	48	44,7
7	9	2,8
9	1	0,1
11	5	5,3
13	2	2,0
15	1	0,1

Conforme apresentado na tabela (4.1), os valores de distorções harmônicas para o quinto, décimo primeiro e décimo terceiro são bem próximos; os módulos para o sétimo harmônico e os harmônicos de ordem tripla (terceiro, nono e décimo quinto) apresentam algumas divergências, porém as mesmas podem ser desconsideradas. Com o objetivo de facilitar a comparação dos resultados, são detalhadas na tabela apenas as distorções harmônicas até a décima quinta ordem.

Desta forma, como os resultados obtidos a partir da simulação e os valores medidos em campo apresentam módulos bastante próximos, pode-se concluir que a modelagem do sistema elétrico da indústria está próxima do real.

4.4 Escaneamento das Impedâncias pela Frequência e Distorções Harmônicas nas Barras

Após a constatação de que a modelagem do sistema elétrico foi realizada de forma correta, pode-se analisar os resultados da simulação como os escaneamentos das impedâncias pela frequência e as distorções harmônicas nas barras.

O escaneamento da impedância pela frequência consiste em um gráfico de impedância (Volt por Ampère de corrente harmônica injetada) em função da frequência, na barra em análise. Neste método, valores elevados de impedância indicam a existência da ressonância paralela, enquanto valores reduzidos revelam a ressonância série. Devido à facilidade em se identificar as frequências de ressonância e associá-las às impedâncias do sistema e do banco de capacitores, esta técnica se mostra bastante interessante.

Como a correção do fator de potência é realizada de forma automática nos dois CCM's, a potência reativa de ambos deve refletir a situação real vivenciada pelos capacitores quando de suas queimas. Conforme descrito anteriormente, através das medições realizadas nos dois bancos de capacitores, verificou-se que as configurações de potência reativa mais comuns para os CCM's 1 e 2 foram de 200 e 225 kVAr e de 100 e 125 kVAr, respectivamente. As figuras (4.2) e (4.3) apresentam as frequências de ressonância para os CCM's 1 e 2, respectivamente, obtidas a partir das simulações.

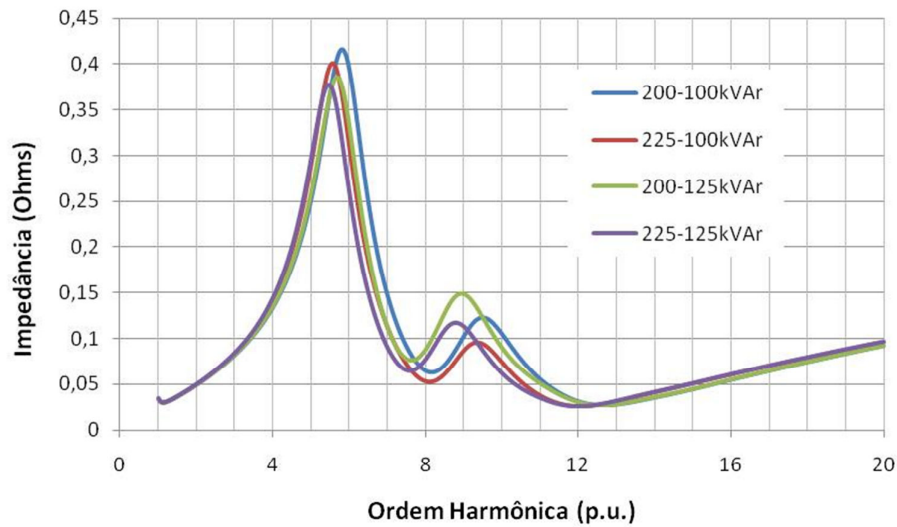


Figura 4.2 Escaneamentos das impedâncias pela frequência no CCM-1 para quatro diferentes configurações de potências reativa.

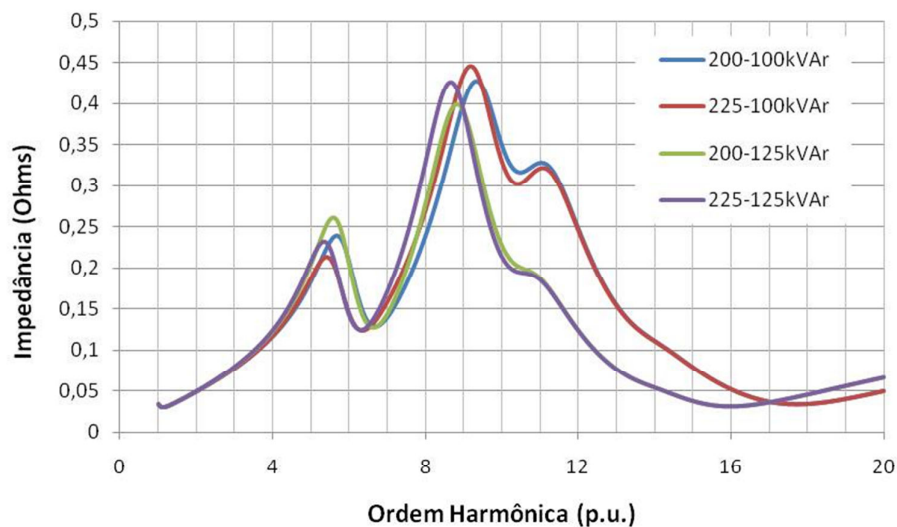


Figura 4.3 Escaneamentos das impedâncias pela frequência no CCM-2 para quatro diferentes configurações de potências reativa.

As figuras (4.2) e (4.3) revelaram, nas barras dos CCM's, a existência de duas frequências de ressonância nas mesmas ordens, 5,6ª e 9ª, porém com magnitudes diferentes. Em ambas, o pico com maior módulo identifica a frequência de ressonância obtida, principalmente, através da interação entre o sistema e os capacitores instalados na barra em questão, enquanto a ressonância com o menor pico é influenciada fundamentalmente pela impedância indutiva do sistema e pelo banco instalado no outro CCM.

A figura (4.3) mostrou claramente que o CCM-2 tende a amplificar as ordens mais elevadas, com módulo máximo de $0,43\Omega$, mantendo valores eminentes por várias frequências, desde a oitava até a décima primeira ordem, aproximadamente. O valor da impedância para a primeira frequência de ressonância é menor, de $0,26\Omega$. Neste CCM, a ampliação dos módulos das impedâncias com ordens mais elevadas é resultado de uma terceira frequência de ressonância obtida, fundamentalmente, através da interação entre o sistema e o banco de capacitores instalado para corrigir o fator de potência na bomba de captação (de 65 kVAr).

Quanto maior a potência reativa instalada na barra em análise, menor a influência que capacitores instalados em barras próximas exercem na mesma. A veracidade de tal afirmativa pode ser comprovada através de três evidências.

A primeira está relacionada ao fato da terceira ressonância do CCM-2 ser mais pronunciada quando a potência reativa instalada na barra é menor, de 100 kVAr. A segunda é a ausência de um terceiro pico de ressonância no CCM-1, resultado da pequena influência que o capacitor de 65 kVAr exerce nesta barra, com potência reativa maior, de 200 ou de 225 kVAr.

A última evidência é a inexistência de quatro picos de ressonância nas respostas em frequências dos dois CCM's, resultado da pequena influência que o banco responsável pela compensação reativa da bomba de recirculação exerce nas duas barras. Este banco de 35 kVAr possui uma baixa potência reativa, quando comparada às instaladas nos CCM's 1 e 2, de 200/225 kVAr e 100/125 kVAr, respectivamente.

No CCM-1, as frequências de ressonância de ordens menores são mais amplificadas, sendo a de 5,6ª harmônica, a ordem mais pronunciada, com módulo de $0,42\Omega$. Já o seu segundo pico apresenta uma magnitude menor, de aproximadamente $0,15\Omega$, situação evidenciada na figura (4.2).

As distorções harmônicas obtidas para as quatro configurações de potência reativa descritas são apresentadas na tabela (4.2):

Tabela 4.2 Distorções harmônicas nos CCM's obtidas a partir da simulação para quatro diferentes configurações de potências reativa.

	Potências reativas associadas	THD _v - CCM-1	THD _v - CCM-2
1ª Configuração	200kVAr - CCM-1 100kVAr - CCM-2	6,8%	12,0%
2ª Configuração	200kVAr - CCM-1 125kVAr - CCM-2	7,6%	11,0%
3ª Configuração	225kVAr - CCM-1 100kVAr - CCM-2	8,1%	12,2%
4ª Configuração	225kVAr - CCM-1 125kVAr - CCM-2	8,9%	11,3%

Conforme identificado na tabela (4.2), o CCM-1 apresentou distorções que variaram de 6,8% a 8,9%, valores relativamente altos para uma barra que alimenta uma proporção insignificante de cargas não lineares (inversores), que corresponde a apenas 11% da potência de seu quadro de cargas. Este problema pode ser justificado através de dois motivos principais: a absorção da distorção proveniente do CCM-2 e o fato da frequência de ressonância da barra estar próxima à ordem com o maior módulo de corrente harmônica injetada no sistema, a quinta.

No CCM-2, a distorção harmônica verificada foi ainda maior, variando de 11% a 12,2% e é resultado da grande proporção de cargas não lineares instalada na barra, cerca de 65% da potência instalada, e da amplificação de ordens próximas às características injetadas pelos conversores de seis pulsos, mais especificamente à décima primeira harmônica.

Na tabela (4.2) também é revelado um aumento de 31% na distorção harmônica do CCM-1 quando a potência reativa do banco de capacitores foi alterada de 200 para 225 kVAr. Esta alteração é resultado da redução da frequência de ressonância, influenciada principalmente pelo banco instalado nesta barra, para ordens próximas ao quinto harmônico, frequência com maior injeção de corrente pelos conversores. Já no CCM-2, a alteração da potência do banco de capacitores de 125 para 100 kVAr aumentou a distorção harmônica na barra em apenas 11%, não afetando esta grandeza de forma significativa.

No CCM-2, para as quatro condições operacionais do banco de capacitores descritas na tabela (4.2), as distorções harmônicas totais na tensão ficaram acima de 8%, limite estabelecido pela Resolução 414 da ANEEL, para consumidores alimentados com tensão igual ou inferior a 13,8kV. Para o CCM-1, os valores de distorção harmônica

total ficaram acima do limite estabelecido pela ANEEL apenas quando a potência reativa do banco foi de 225 kVAr.

Conforme verificado, o uso de bancos de capacitores automáticos resultou em combinações de estágios com maior distorção harmônica na tensão, principalmente para o CCM-1. Desta forma, em locais com grande porcentagem de cargas não lineares e possibilidade de ressonâncias em frequências com módulos consideráveis de injeção de correntes harmônicas, o uso destes controladores deve ser evitado.

4.5 Cálculo da Potência Reativa Necessária para a Correção do Fator de Potência

O cálculo da potência reativa necessária para a correção do fator de potência nos dois CCM's é realizado a partir dos dados obtidos nas medições em cada CCM sem a presença destes dispositivos.

A potência reativa necessária para a correção do fator de potência de uma instalação pode ser estimada através da subtração da potência reativa calculada com o fator de potência desejado com a potência reativa existente sem os bancos. A diferença encontrada é a potência reativa que deverá ser adicionada ao sistema. Vale salientar que todas as grandezas envolvidas estão na frequência fundamental e desconsideram, por consequência, os efeitos dos harmônicos. A equação (4.3) apresenta um método tradicional no cálculo do banco de capacitores necessário (IEEE(2),1992):

$$Q_{\text{capacitor}} = P \times [\tan(\text{acos}(fp_1)) - \tan(\text{acos}(fp_2))] \quad (4.3)$$

Sendo:

$Q_{\text{capacitor}}$ = potência reativa necessária para a correção do fator de potência (kVAr)

P = potência ativa absorvida pela instalação (Watts)

fp_1 = fator de potência original da instalação

fp_2 = fator de potência desejado

A Resolução 414 da ANEEL exige um fator de potência indutivo mínimo de 0,92, porém, por margem de segurança os cálculos dos bancos de cada CCM são

realizados para elevar o fator de potência indutivo para 0,95. Os procedimentos de cálculo dos capacitores estão abaixo:

Cálculo do banco para o CCM-1:

- Potência verificada sem os capacitores: (252,56 + 250,54)kVA ou (355,75∠44,77°)kVA
- Potência reativa necessária para a devida correção do fator de potência:

$$252,56 \times (\tan(\arccos(0,71)) - \tan(\arccos(0,95))) \text{ kVAr}$$

$$Q_{capacitor} = 167,53 \text{ kVAr}$$

Cálculo do banco para o CCM-2:

- Potência medida sem os capacitores: (365,52 + 205,62)kVA ou (419,39∠29,36°)kVA
- Potência reativa necessária para a correção do fator de potência:

$$365,52 \times (\tan(\arccos(0,871)) - \tan(\arccos(0,95))) \text{ kVAr}$$

$$Q_{capacitor} = 85,48 \text{ kVAr}$$

De posse de tais informações, foram escolhidos para as correções dos fatores de potência, um banco com potência comercial de 175kVAr para o CCM-1 e um de 100kVAr para o CCM-2.

Essas duas novas configurações de potências reativas foram simuladas e os escaneamentos das impedâncias próprias das duas barras, identificados na figura (4.4), revelaram que as frequências de ressonância de maiores módulos ocorrem na 6,1ª ordem no CCM-1 e na 9,6ª harmônica, no CCM-2. A simulação também indicou distorções harmônicas elevadas nas duas barras, de aproximadamente 6,1% e 12,0% nos CCM's 1 e 2, respectivamente, indicando risco na instalação de capacitores convencionais na correção do fator de potência.

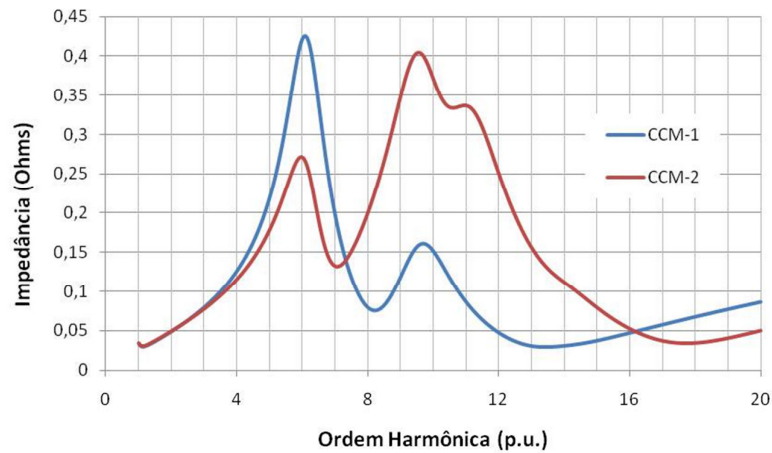


Figura 4.4 Escaneamentos das impedâncias pela frequência para os CCM's 1 e 2 considerando potências reativas de 175kVAr e 100kVAr nas duas barras.

4.6 Análise da Influência da Impedância da Rede na Distorção da Tensão dos CCM's

O CCM-1 apresentou distorções harmônicas bastante elevadas, mesmo tendo em seu quadro uma proporção insignificante de cargas não lineares. Como já descrito anteriormente, a razão mais provável para tal está relacionada à absorção da distorção harmônica proveniente do CCM-2, barra com inúmeros conversores de frequência. A seguir, análises são conduzidas, visando à identificação da influência da impedância da rede de alimentação nas distorções harmônicas de cada uma das barras.

4.6.1 Efeito da Alteração da Potência de Curto-Circuito na Distorção da Tensão dos CCM's

Para uma mesma fonte de harmônicos, o sistema apresenta, geralmente, uma distorção harmônica total de tensão maior para instalações com potência de curto circuito mais baixas. As correntes harmônicas fluem para as impedâncias de menor valor, geralmente em direção ao sistema elétrico, com o aumento da potência de curto-circuito, o sistema absorve ainda mais estas correntes, o que, na maioria das vezes, reduz as distorções harmônicas nas barras.

Em alguns casos, a solução para se reduzir a distorção harmônica nas barras consiste no fortalecimento da rede de alimentação, a partir da elevação da potência de curto-circuito, alternativa que pode ser alcançada através da adição de linhas em paralelo à existente, novos geradores ou substituição do transformador por um equipamento de maior potência, geralmente envolvendo custos elevados.

A razão de curto-circuito da mineradora é bastante baixa, de aproximadamente quatro vezes, e visando analisar a influência da impedância da rede nas distorções harmônicas dos CCM's, o sistema foi simulado para razões de curto-circuito que variam de 4 (razão da instalação) a 20 (valor para um sistema mais robusto), em todas, a razão X/R da impedância da rede não foi alterada. A tabela (4.3) identifica as distorções harmônicas encontradas para as cinco diferentes razões de curto-circuito e a figura (4.5) apresenta as impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1, definidas como a elevação da tensão (em Volts) no CCM-1 para cada Ampère de corrente harmônica injetada no CCM-2 em respectivas frequências.

Tabela 4.3 Distorções harmônicas encontradas através da variação da razão de curto-circuito da rede de alimentação, desconsiderando-se o filtro.

Razão de curto-circuito	THDv - CCM-1	THDv - CCM-2
4	6,1%	12,0%
8	3,8%	11,5%
12	2,8%	12,1%
16	2,3%	12,7%
20	2,0%	13,3%

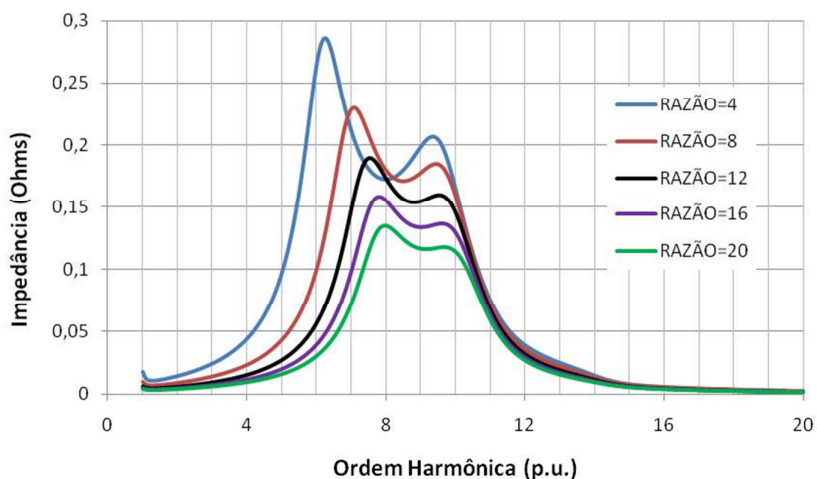


Figura 4.5 Impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1, obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito, desconsiderando-se o filtro.

A tabela (4.3) revela que o fortalecimento da rede de alimentação reduziu drasticamente a distorção harmônica no CCM-1, resultado da diminuição da impedância de transferência entre as duas barras, de $0,29\Omega$ (sistema original) para $0,13\Omega$ (para razão de curto-circuito de 20). A figura (4.5) mostrou um deslocamento da frequência com maior transferência da 6,2ª ordem para 8,0ª, para razões de curto-circuito de 4 e 20, respectivamente.

No CCM-2, o fortalecimento da rede primeiramente reduziu a distorção harmônica, porém para razões de curto-circuito acima de doze, o efeito foi contrário: a elevação, mesmo que pequena, desta grandeza. A obtenção de tal resultado pode ser explicada através do escaneamento da impedância própria da barra, definida como a elevação da tensão (em Volts) verificada na barra em análise para cada Ampère de corrente harmônica injetada na mesma barra em respectivas frequências, identificada na figura (4.6).

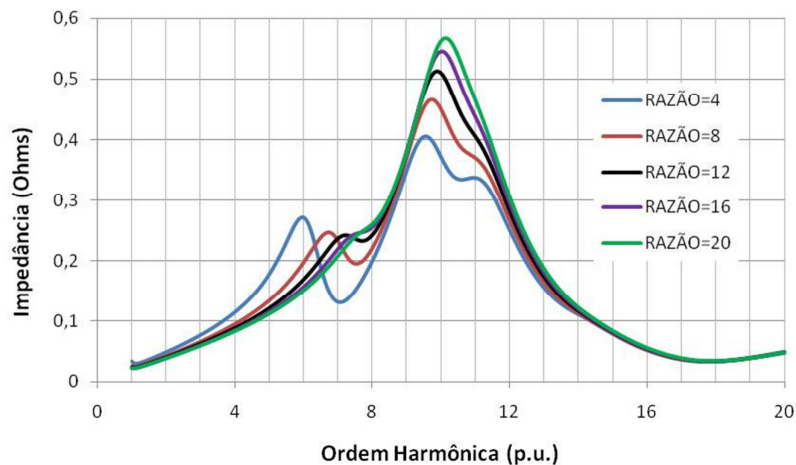


Figura 4.6 Impedâncias próprias na barra do CCM-2 obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito, desconsiderando-se o filtro.

O aumento da potência de curto-circuito deslocou a frequência de ressonância para ordens mais elevadas, além de unificar as três frequências de ressonância em um só pico de maior módulo que as originais, situação evidenciada na figura (4.6).

A figura (4.6) também revela que o aumento da potência de curto-circuito reduz a influência que outros capacitores exercem sobre o CCM-2 e funciona como um desacoplamento entre as barras do sistema. Ao fazê-lo, frequências de ressonância influenciadas por outras barras se tornaram desprezíveis, criando-se uma única ressonância de maior módulo que as originais e dependente, principalmente, da

interação entre seu capacitor e o sistema de alimentação, o que resultou em condições harmônicas ligeiramente mais severas.

O aumento da distorção harmônica no segundo CCM só não foi mais pronunciado pelo fato da variação da potência de curto-circuito ter reduzido o pico da ressonância que ocorria em ordens menores (influenciado principalmente pelo capacitor do CCM-1), que engloba as frequências com conteúdo harmônico injetado pelas cargas não lineares maior, principalmente para o quinto harmônico.

A elevação da potência de curto-circuito reduziu a distorção harmônica no CCM-1, porém aumentou, mesmo que de forma insignificante, esta grandeza no CCM-2, e por possuir um custo de implantação bastante elevado, se mostrou uma alternativa inviável.

4.6.2 Efeito da Alteração da Relação X/R da Rede de Alimentação

A mineradora apresentou uma baixa razão entre a reatância indutiva e a resistência da rede de alimentação (cerca de 0,60), o que está relacionado ao fato do consumidor ser alimentado através de condutores de pequena bitola e estar localizado no final da rede de distribuição, em área rural. Segundo o trabalho de Paulino (1985), as seções típicas dos condutores utilizados na distribuição da energia elétrica em 13,8 kV variam entre 4AWG e 336,4MCM, que possuem relação X/R situada entre 0,6 e 3,52.

A partir da variação da relação X/R da rede de alimentação de 0,6 a 3,6, uma avaliação do impacto desta grandeza sobre a distorção harmônica em cada um dos CCM's é realizada. A figura (4.7) mostra a impedância de transferência entre os CCM's 2 e 1, enquanto a tabela (4.4) revela as distorções harmônicas encontradas a partir da variação da relação X/R da rede de alimentação.

Tabela 4.4 Distorções harmônicas encontradas através da variação da razão X/R da linha de alimentação da mineradora.

Razão X/R da linha	THDv - CCM-1	THDv - CCM-2
0,6	6,1%	12,0%
1,3	10,4%	14,5%
2,1	13,0%	16,4%
2,8	14,2%	17,3%
3,6	15,0%	17,8%

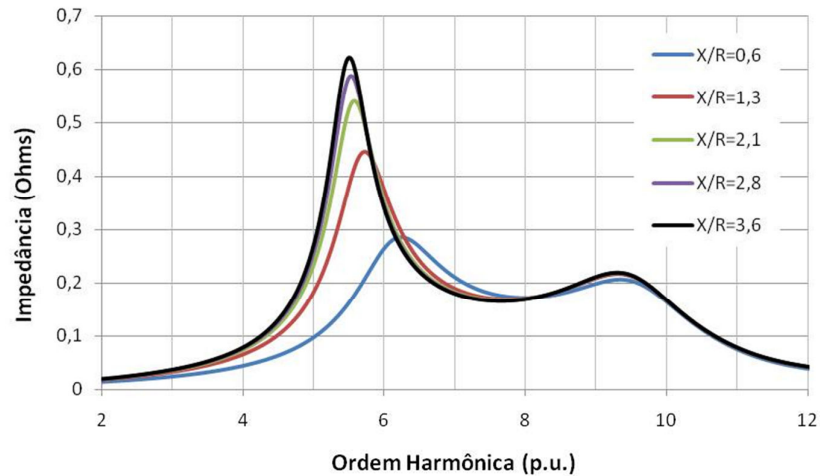


Figura 4.7 Impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1 obtidas a partir da variação da relação X/R da rede de alimentação, desconsiderando-se o filtro.

Como a potência de curto-circuito foi mantida constante em todas as configurações, a alteração da razão X/R da rede acarretou em uma redução do valor da resistência e elevação da reatância indutiva, resultando em um pequeno deslocamento de todas as frequências de ressonância para ordens menores.

Os resultados do aumento da relação X/R da rede de alimentação para as ressonâncias série e paralela são: de reduzir e elevar as impedâncias nestas ordens, respectivamente, atuando em uma gama menor de frequências. A figura (4.7) revelou que o efeito da alteração da razão X/R da rede é mais pronunciado para frequências de ressonância menores e quase imperceptível para ordens mais elevadas.

Na impedância de transferência entre os CCM's 2 e 1, foi observada uma elevação acentuada no pico da primeira ressonância paralela, próxima a quinta ordem, e pequenas reduções e elevações nos módulos das ressonâncias série e paralela, respectivamente, em ordens mais elevadas.

A figura (4.8) revela as impedâncias próprias do CCM-2 obtidas a partir da variação da relação X/R da rede de alimentação.

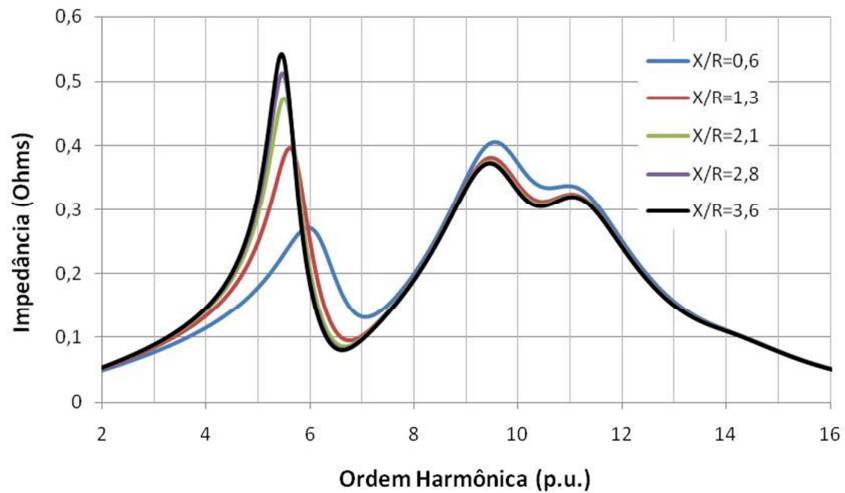


Figura 4.8 Escaneamentos das impedâncias pela frequência para o CCM-2, considerando a variação da razão X/R da rede, desconsiderando-se o filtro.

Na impedância própria do CCM-2, identificada na figura (4.8), ocorreram elevações significativas e limitações das faixas próximas à da primeira ressonância. As reduções dos módulos do segundo e terceiro picos são resultados da amplificação dos efeitos da ressonância série, cuja ordem se situa entre as duas ressonâncias paralelas.

As distorções harmônicas verificadas nos CCM's 1 e 2 atingiram níveis elevadíssimos para a relação X/R da rede de 3,6 (de 15,0% e 17,8%, respectivamente), devido à dois motivos principais. O primeiro motivo está relacionado ao deslocamento das ressonâncias para ordens mais baixas e o segundo à elevação acentuada da impedância na frequência de ressonância de menor ordem, próxima ao quinto harmônico, frequência com maior injeção de corrente no sistema elétrico.

4.6.3 Efeito das Alterações da Razão de Curto-Circuito e da Relação X/R

Muitas vezes, a elevação da potência de curto-circuito é decorrência do aumento da área do condutor de alimentação e/ou alteração da topologia da rede, o que implica em uma elevação da relação X/R da rede de alimentação. Visando analisar os efeitos da alteração destas duas grandezas, o sistema foi simulado considerando uma relação X/R de 3,6 e razão de curto-circuito de 20 e as configurações iniciais (razão de curto de 4 e relação X/R de 0,6). A figura (4.9) identifica as impedâncias de transferência entre o CCM-2 e o CCM-1, enquanto a figura (4.10) e a tabela (4.5) revelam a impedância do segundo CCM e as distorções nas duas barras, respectivamente.

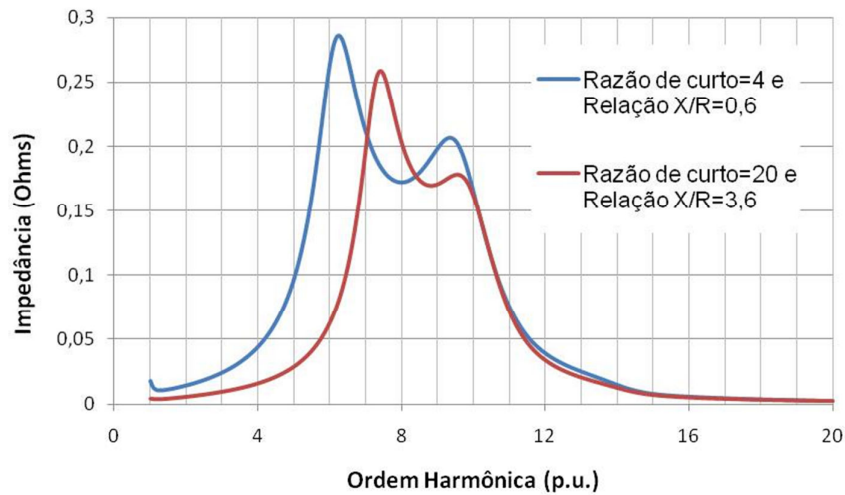


Figura 4.9 Impedâncias de transferência entre os CCM's 2 e 1 obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito e da relação X/R da rede, sem o filtro.

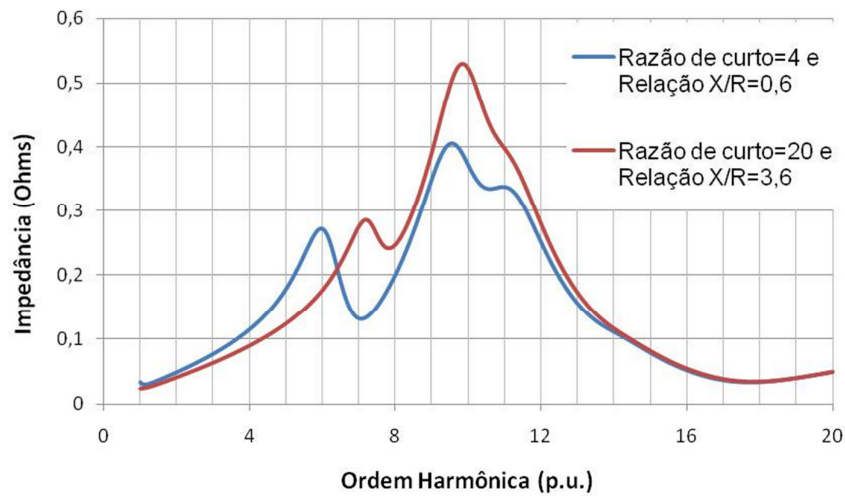


Figura 4.10 Impedâncias próprias do CCM-2 obtidas a partir da variação da razão de curto-circuito e da relação X/R da rede, sem o filtro.

Tabela 4.5 Distorções harmônicas obtidas variando-se a relação X/R da rede e a razão de curto-circuito, sem o filtro.

Grandezas do sistema		Distorções Harmônicas	
Relação X/R	Razão de curto-circuito	THD _v CCM-1	THD _v CCM-2
0,6	4	6,1%,	12,0%,
3,6	20	3,2%	11,9%

A figura (4.9) mostra que o fortalecimento do sistema e a variação da razão X/R da rede reduziram a influência exercida pelo segundo CCM no CCM-1 e deslocaram as frequências de ressonância para ordens mais elevadas. O resultado de tais alterações foi uma redução na distorção harmônica na tensão da barra, de 6,1% para 3,2%, apresentada na tabela (4.5).

No CCM-2, a variação dessas duas grandezas deslocou as frequências de ressonância para ordens mais elevadas e reduziu a influência exercida pelo capacitor de 65 kVAr, criando uma ressonância de módulo mais elevado, obtida, principalmente, através da interação entre os capacitores instalados na barra em análise e o sistema elétrico. Conforme apresentado na figura (4.10), não houve alteração no módulo da primeira ressonância desta barra (influenciada, principalmente, pelo capacitor instalado no CCM-1), devido ao efeito do aumento da relação X/R da rede ser mais pronunciado para ressonâncias paralelas de menor ordem. A variação das duas grandezas resultou em uma redução desprezível da distorção harmônica do CCM-2, de 12,0% para 11,9%.

4.7 Definições do Filtro e do Banco de Capacitores nos CCM's

Em uma instalação elétrica, filtros passivos podem ser empregados na mitigação do problema de excesso de distorção harmônica. Um dos critérios mais utilizados para a definição do tipo de filtro, sintonizado ou dessintonizado, considera a distorção harmônica medida sem a presença dos capacitores. A tabela (4.6) identifica estas situações para os dois CCM's:

Tabela 4.6 Distorções harmônicas medidas sem a presença dos bancos de capacitores.

Barra	THD _v
CCM-1	2,5%
CCM-2	6,1%

No CCM-2, o fato da distorção medida sem a presença dos capacitores ser bastante elevada, de 6,1%, indica que a mesma deve ser reduzida, o que pode ser alcançado através da instalação de um filtro sintonizado na frequência com maior distorção, no estudo em questão, no 5º harmônico. Caso a instalação do filtro não seja

suficiente para reduzir esta grandeza, filtros sintonizados nas frequências onde foram verificadas as maiores distorções (nas 7^a, 11^a, 13^a ordens) devem ser instalados.

O objetivo da instalação de um filtro sintonizado consiste na absorção de parte da corrente harmônica gerada pelas cargas não lineares, o que, na maioria das vezes, reduz a distorção observada na barra em análise. Porém, caso a especificação destes elementos esteja incorreta, a sua instalação poderá elevar a distorção harmônica para níveis superiores àqueles verificados inicialmente. Quando a impedância do sistema elétrico é predominantemente indutiva, após a inserção do filtro, o pico de ressonância ocorre em uma frequência inferior à de sintonia (SUTANTO, 1991), desta forma o novo sistema deverá ser simulado para verificação se as grandezas encontradas nos dois CCM's estão dentro dos níveis de referência estabelecidos pela Resolução 414 e indicados pelo guia IEEE 519.

O quadro é bastante diferente para o CCM-1, uma vez que a distorção harmônica verificada sem a presença dos capacitores é baixa, de apenas 2,5%. O resultado encontrado indica que não há necessidade de reduzir a distorção, mas de apenas não amplificá-la. Nestas situações, um filtro dessintonizado, geralmente, é instalado. Estes equipamentos são responsáveis pelo deslocamento da frequência de ressonância para ordens não características no sistema e não possuem a função de absorver as correntes harmônicas.

Como uma das prováveis causas para as elevadas distorções harmônicas encontradas no CCM-1 é a absorção das distorções provenientes do CCM-2, primeiramente será simulada a instalação de apenas um banco de capacitores convencionais na primeira barra. Caso o valor da distorção harmônica ainda seja elevado, a próxima etapa consistirá na simulação do sistema elétrico considerando um filtro dessintonizado no CCM-1.

As distorções harmônicas totais nas tensões obtidas na simulação do sistema, considerando as instalações do banco de capacitores de 175 kVAr e do filtro sintonizado, nos CCM's 1 e 2, respectivamente, são apresentadas na tabela (4.7), enquanto a figura (4.11) revela as impedâncias próprias das barras pela frequência.

Tabela 4.7 Distorções harmônicas obtidas através da simulação do sistema, considerando o banco de capacitores de 175 kVAr e o filtro sintonizado para os CCM's 1 e 2, respectivamente.

Barra	THD _v
CCM-1	2,2%
CCM-2	3,7%

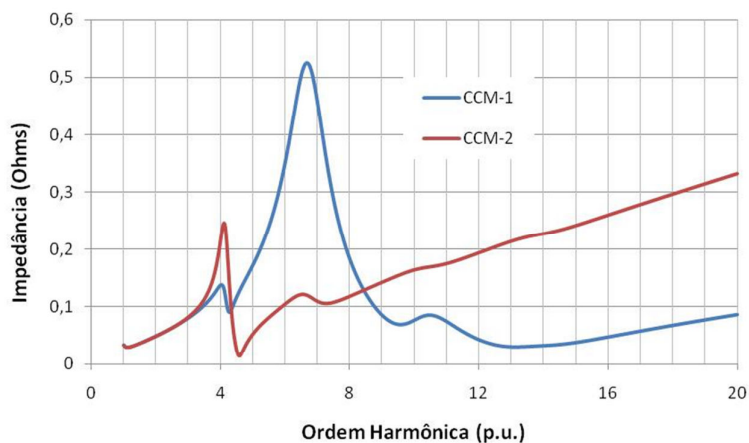


Figura 4.11 Escaneamentos das impedâncias pela frequência considerando o banco de capacitores para o CCM-1 e o filtro sintonizado para o CCM-2.

A figura (4.11) identifica uma ressonância paralela na 4,1ª ordem para o CCM-2, o que não resultará em maiores problemas, uma vez que esta frequência não é característica no sistema em questão. Como já era esperado, esta barra apresentou uma ressonância série próxima à frequência de sintonia do filtro, na 4,6ª ordem. O gráfico também mostra que a instalação do filtro resulta em uma elevação da impedância própria com a frequência para ordens superiores à de sintonia.

Mesmo o CCM-1 apresentando uma ressonância de módulo considerável na 6,7ª ordem, próxima à sétima, frequência característica no sistema, a distorção harmônica verificada em sua barra foi baixa. A variação drástica desta grandeza, de 6,1% para 2,2%, foi causada apenas pela redução da distorção harmônica proveniente do CCM-2, com a instalação do filtro sintonizado, não sendo necessária, por consequência, a instalação de um filtro dessintonizado na barra, visando ao deslocamento da frequência de ressonância para ordens menores.

Como as distorções harmônicas totais, bem como as individuais, encontradas na simulação ficaram abaixo dos níveis de referência estabelecidos pela Resolução 414 e indicados pelo guia IEEE 519 e a configuração final apresentou uma boa relação custo-

benefício, a mesma será utilizada para mitigar o problema da queima dos capacitores na indústria.

Caso o nível de distorção harmônica em um dos CCM's estivesse acima do valor recomendado pela norma, pode-se aumentar a potência reativa do banco, sintonizar o filtro em uma frequência diferente ou instalar novos filtros com outras frequências de sintonia, visando à redução da distorção para níveis aceitáveis.

4.8 Análise da Influência do CCM-2 no CCM-1 através da Impedância de Transferência entre as duas barras

Uma análise bastante interessante para a identificação da influência do CCM-2 no primeiro CCM pode ser realizada a partir da impedância de transferência entre eles, revelada na figura (4.12). Nela, a compensação reativa é realizada por um banco de capacitores de 175 kVAr para o CCM-1 e um de 100 kVAr para o CCM-2.

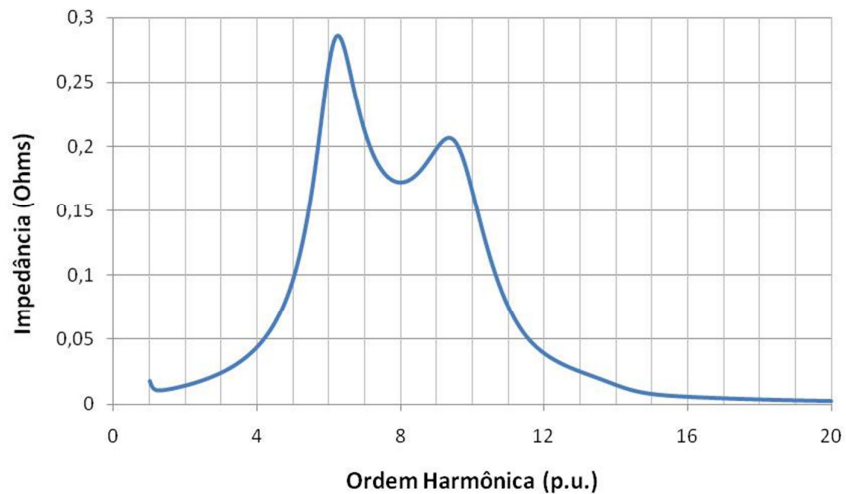


Figura 4.12 Impedância de transferência entre os CCM's 2 e 1 considerando capacitores de 100 e 175 kVAr, respectivamente, e desconsiderando o filtro.

A figura (4.12) revela uma grande interligação entre os CCM's, com maior transferência nas frequências de ressonância das barras, amplificando principalmente da quinta à décima ordem harmônica.

A redução da distorção harmônica no CCM-1, alcançada através da instalação do filtro sintonizado no CCM-2, está profundamente relacionada à alteração da

impedância de transferência entre as duas barras, e a nova impedância de transferência, considerando o filtro, é identificada na figura (4.13):

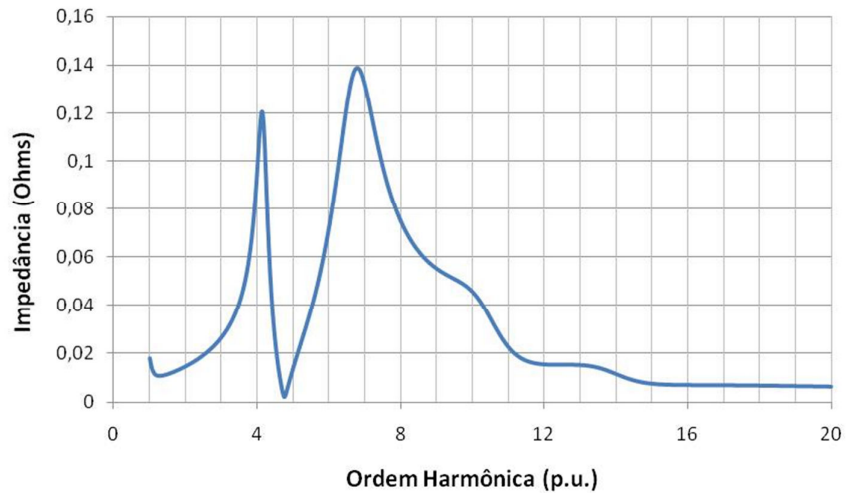


Figura 4.13 Impedância de transferência entre os CCM's 2 e 1 considerando o filtro e o capacitor de 175 kVAr, respectivamente.

A figura (4.13) revela que a instalação do filtro reduz drasticamente a interligação entre as duas barras, principalmente nas ordens próximas à de sintonia do equipamento, a 4,8^a ordem harmônica. Como a quinta é a ordem com maior módulo de corrente injetada no sistema elétrico, verificou-se uma diminuição significativa na distorção harmônica do CCM-1, de 6,1% para 2,2%.

Mesmo apresentando maior transferência na 6,8^a ordem harmônica, próxima à frequência de ressonância do CCM-1, o módulo mais elevado da impedância, de 0,14Ω, equivale a apenas 48% do valor máximo verificado sem a instalação do filtro, de 0,29Ω, impedância identificada na figura (4.12). Já o primeiro pico na impedância de transferência, na 4,1^a ordem harmônica, é resultado da ressonância paralela gerada no CCM-2 após a instalação do filtro, cuja frequência é inferior à de sintonia do equipamento.

4.9 Divisão dos Capacitores em Estágios

A instalação de capacitores, visando à correção do fator de potência, resulta em elevações nas tensões do sistema desde a barra de conexão dos dispositivos até a geração da energia elétrica. Como alterações bruscas de tensão são indesejáveis, o

estágio máximo de potência reativa que pode ser energizado é influenciado pela variação na tensão do sistema quando da alimentação destes dispositivos e quanto maior a potência de curto circuito da instalação, menor o efeito descrito. A fim de quantificar esta variação, o guia IEEE Std 1036-1992 sugere uma limitação na variação da tensão em 2 a 3%, que pode ser estimada através da equação (4.4):

$$\Delta V = \left(\frac{Q_{\text{capacitor}}}{S_{\text{sc}}} \right) \times 100\% \quad (4.4)$$

Considerando:

ΔV = variação da tensão decorrente da instalação dos capacitores (%)

$Q_{\text{capacitor}}$ = potência reativa do banco de capacitores (em kVAr)

S_{sc} = potência de curto circuito no local de instalação do banco (kVA)

Considerando a variação máxima na tensão de 3% e a potência de curto-circuito de 4,5MVA, obtida no ponto de instalação dos bancos de capacitores nos dois CCM's, o estágio máximo de potência reativa a ser energizado encontrado a partir da equação (4.4) é de 135 kVAr.

Como a instalação do reator em série com o capacitor no CCM-2 praticamente inibe a variação da tensão quando da energização deste último e sua potência reativa está abaixo de 135 kVAr, o banco não deverá ser seccionado em estágios. Porém, como a potência reativa do CCM-1 está acima do valor calculado para resultar em uma alteração de 3% na tensão quando de sua energização, o banco deste CCM deverá ser seccionado em dois estágios, de 100 e 75 kVAr.

4.10 Características do Filtro Sintonizado do CCM-2

Os filtros sintonizados passivos são constituídos por elementos série resistivos, capacitivos e indutivos e podem reduzir a distorção harmônica, prover a regulação da tensão, além de corrigir o fator de potência da instalação elétrica. A resposta em frequência destes filtros apresenta uma elevação da impedância com a frequência para ordens acima da frequência de sintonia e nesta ordem específica uma impedância baixa, de valor praticamente igual à sua resistência série. Os elementos do filtro devem ser

projetados para suportarem as correntes harmônicas da frequência de sintonia e de ordens superiores próximas a mesma.

4.10.1 Local da Instalação do Filtro de Harmônicos

Os filtros de harmônicos passivos podem ser instalados junto às cargas não lineares ou na barra de distribuição. Em geral, a instalação destes filtros em cargas individuais é mais eficiente na mitigação de harmônicos, enquanto sua conexão nas barras de distribuição é a melhor opção quando a correção do fator de potência é prioridade.

A conexão de filtros em cargas não lineares necessita de um reator ou transformador do lado das mesmas, o guia IEEE Std 519-1992 sugere uma impedância de 5% para a prevenção de sobrecargas de harmônicos provenientes de outras fontes não lineares no filtro. Este reator aumenta a impedância no ponto de conexão, o que reduz a tendência de harmônicos gerados por outras fontes serem absorvidos pelo filtro.

Como a instalação elétrica da mineradora possui um baixo fator de potência e um alto índice de distorção harmônica, a alternativa tecno-econômica mais interessante consiste na instalação destes filtros na barra de distribuição. Outro fator que inviabiliza a instalação dos filtros nas cargas individuais está relacionado ao grande número de conversores no CCM-2 (cinco), o que exigiria a instalação de vários filtros.

4.10.2 Frequência de Sintonia do Filtro

A frequência de sintonia do filtro deverá ser ligeiramente menor que a ordem escolhida para filtragem, com o objetivo de se permitir a manutenção da tolerância dos capacitores e evitar a sintonização do filtro exatamente na frequência com altos níveis de distorção. Caso os filtros sejam sintonizados nestas frequências, uma ressonância série será criada, resultando em correntes excessivas em seus elementos.

O guia IEEE 1531-2003 sugere que a frequência nominal de sintonia destes equipamentos seja 6% abaixo da ordem em que a filtragem será realizada. Um dos motivos para sintonizar filtros nestas ordens está relacionada ao fato dos capacitores de polipropileno metalizado (PPM) perderem sua capacitância com o tempo, o que resulta em um aumento da frequência de sintonia do filtro. Desta forma, para equipamentos

com esta tecnologia, a sintonização em frequências abaixo da ordem inteira se mostra ainda mais importante.

No caso em estudo, como capacitor utilizado será o impregnado “All Film”, uma tecnologia que praticamente não apresenta alterações na capacitância com o tempo, e o fato do filtro ter de absorver o quinto harmônico, a frequência de sintonia será apenas de 4% abaixo da nominal de 288 Hz, na 4,8ª ordem.

4.10.3 Configuração do Filtro Sintonizado

As configurações mais comuns para filtros sintonizados com conexão isolada e capacitores monofásicos são identificadas na figura (4.14); na primeira, capacitores e indutores são instalados em estrela e na segunda, em delta.

Os dois modos de ligação apresentam a mesma eficácia na filtragem dos harmônicos e a seleção de cada um está relacionada às grandezas elétricas às quais os elementos estarão submetidos. Na ligação em estrela, os capacitores e os indutores deverão suportar tensões menores e correntes maiores, quando comparados aos mesmos conectados em delta.

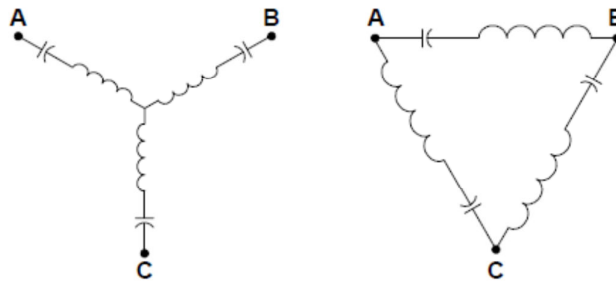


Figura 4.14 Configurações mais comuns para filtros sintonizados com conexão isolada.
Fonte (IEEE, 2003)

Como em aplicações de baixa tensão, o custo de um capacitor trifásico é menor quando comparado a três dispositivos monofásicos, o banco utilizado no filtro será trifásico. A configuração do banco escolhida será a delta, pelo fato destes elementos possuírem capacitâncias menores e terem de suportar correntes também menores, resultando em uma economia na sua fabricação. A configuração dos elementos do filtro sintonizado do CCM-2 é identificada na figura (4.15):

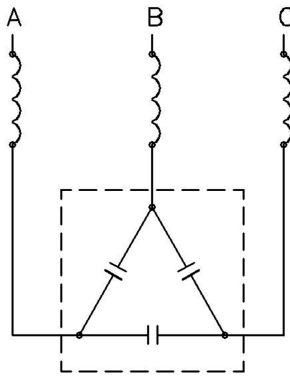


Figura 4.15 Configuração do filtro sintonizado instalado no CCM-2

4.10.4 Cálculo da Capacitância do Capacitor

A capacitância do capacitor utilizado no filtro é calculada a partir da sua tensão, potência e frequência nominais, conforme o cálculo abaixo:

$$C = \frac{Q_{\text{capacitor}}}{2\pi \times f \times V^2} \quad (4.5)$$

Considerando:

C = capacitância do capacitor (Farad)

$Q_{\text{capacitor}}$ = potência reativa nominal do capacitor (VAr)

V = tensão nominal do capacitor (Volts)

f = frequência nominal do capacitor (Hertz)

Ao substituir na equação (4.5) os seguintes valores nominais dos capacitores: tensão de 440 V, potência reativa de 100 kVAr e frequência de 60 Hz, obtêm-se uma capacitância de 457 μ F.

4.10.5 Definição da Indutância do Reator

A indutância do reator é definida a partir da frequência de sintonia do filtro, 4,8ª ordem harmônica, e da capacitância já obtida e é calculada por:

$$L = \frac{1}{(2\pi \times f \times h)^2 \times C} \quad (4.6)$$

Onde:

L = indutância do reator utilizado no filtro (Henrys)

f = frequência nominal do sistema elétrico (Hertz)

h = ordem de sintonia do filtro (p.u.)

C = capacitância do capacitor (Faradays)

No cálculo da indutância do reator, como o capacitor está instalado em delta, a capacitância deve ser encontrada a partir da transformação delta-estrela, em que a reatância capacitiva do capacitor em estrela é igual a um terço do valor identificado no capacitor instalado em delta. Desta forma, para o filtro de 100 kVAr sintonizado na 4,8ª ordem harmônica, com capacitor de capacitância 1,37mF (configuração em estrela), o reator deverá ter indutância de 223μH, valor obtido a partir da substituição das grandezas na equação (4.6).

4.10.6 Definição do Fator de Qualidade do Filtro

De acordo com o guia IEEE 1531-2003, apesar de difícil quantificação, a resistência do filtro deve ser considerada como uma boa ajuda no projeto do filtro por amortecer o valor da impedância do sistema na frequência de ressonância e reduzir, conseqüentemente, o risco de problemas relacionados às ressonâncias paralelas.

Em filtros sintonizados de baixa tensão, o valor da resistência consiste, normalmente, apenas na resistência do indutor, o que aumenta a eficiência do filtro e reduz suas perdas. O fator de qualidade identifica a seletividade do filtro e é calculado através da razão entre a reatância indutiva na frequência de sintonia e a resistência, conforme a equação (4.7):

$$q = \frac{X_o}{R} \quad (4.7)$$

Onde:

q = fator de qualidade do filtro

X_O = reatância do indutor na frequência de sintonia (Ohms)

R = resistência do filtro (Ohms)

Caso o fator de qualidade do filtro seja elevado, este dispositivo é mais seletivo, e atua em uma faixa de frequências limitada. Quando o valor desta grandeza é menor, o filtro atuará em uma gama maior de frequências com menor eficiência e maior amortecimento resistivo.

Segundo o guia IEEE 1531-2003, o valor típico do fator de qualidade (Q) de filtros sintonizados de baixa tensão é 20, uma razão relativamente baixa que apresenta um bom amortecimento na frequência de sintonia. No filtro a ser instalado no CCM-2, é utilizado um fator de qualidade de 20, e o valor da resistência, obtido ao substituir o valor do fator de qualidade e a reatância do indutor na equação (4.7), é de $20,2\text{m}\Omega$.

Como a impedância indutiva do filtro e o cabo de alimentação deste equipamento têm mesma ordem de grandeza, o cabo é considerado na simulação do sistema.

4.10.7 Tensões e Correntes nos Elementos dos Filtros

Os valores de correntes e tensões que os capacitores e os indutores do filtro devem suportar são informados ao fabricante, visando à prevenção de queima destes componentes. As grandezas na frequência fundamental podem ser calculadas, porém os valores eficazes, que consideram harmônicas, devem ser obtidos a partir de simulação.

A absorção de parte da potência reativa pelo indutor do filtro resulta em uma elevação da tensão na frequência fundamental nos terminais do capacitor. A equação (4.8) revela o cálculo aplicável na determinação da tensão após a inserção do reator:

$$V_c = V_s \times \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \quad (4.8)$$

Sendo:

V_c = tensão máxima na frequência fundamental verificada nos terminais do capacitor após a inserção do reator (Volts)

V_s = tensão máxima aplicada no capacitor sem a inserção do reator (em Volts)

h = ordem de sintonia do filtro (p.u.)

No cálculo da tensão máxima na frequência fundamental à qual os capacitores do filtro podem ser submetidos, deve-se considerar a tensão máxima do sistema no ponto de instalação do dispositivo. A partir da equação (4.8), identifica-se que a inserção do reator do filtro sintonizado na 4,8ª ordem eleva em 4,5% a tensão nos terminais do capacitor. A simulação revela que a tensão máxima na frequência fundamental nos elementos do filtro atingiu o valor de 430,2V, enquanto a tensão nos terminais do capacitor chegou ao valor de 450,1V; o que comprova que a inserção do reator resulta em um aumento de 4,5% na tensão nos terminais do dispositivo.

A simulação do sistema também revelou que a distorção harmônica total de tensão verificada no capacitor é de 8,9%, atingindo um valor eficaz de 451,9V em seus terminais. A tabela (4.8) mostra o conteúdo harmônico esperado na tensão do equipamento, obtido nas simulações.

Tabela 4.8 Espectro harmônico esperado na tensão do capacitor do filtro sintonizado

Ordem Harmônica	Distorção na Tensão (%)
3	0,2
5	8,8
7	0,4
9	0,1
11	0,1
13	0,3
15	0,5
17	0,2
19	0,1
21	0,5
23	0,3

Por margem de segurança a tensão máxima do capacitor deve ser de 550V, valor 25% acima da tensão nominal do sistema elétrico em que o filtro é instalado, fornecendo necessariamente uma potência reativa de 100 kVAr, em 440 V.

Informações relacionadas à proteção de reatores em redes poluídas por harmônicos não são divulgadas, enquanto às relativas aos capacitores são amplamente difundidas. Segundo King (2009), estudos mostraram que em filtros RLC série, a porcentagem de queimas de reatores causados por harmônicos é maior que a de capacitores. Desta forma, as características de reatores devem ser analisadas cuidadosamente, visando à prevenção de danos destes elementos.

A principal causa de queima de reatores está relacionada ao sobreaquecimento no seu sistema de isolamento (IEEE, 2003), uma vez que estes elementos podem alcançar temperaturas elevadas em ordens de minutos. Com o tempo, sobreaquecimentos repetitivos podem resultar em estresses nesses elementos, desta forma uma fase do filtro deve ser protegida contra sobretensão, através de um termostato, para desconectar o conjunto em temperaturas danosas. Nos reatores, os locais de perdas consistem, basicamente, no núcleo, no gap e na bobina.

Como a reatância total do filtro é menor que a reatância do capacitor, a máxima corrente na frequência fundamental que pode atravessar os elementos, instalados em série, aumenta com a inserção do reator e pode ser calculada por:

$$I = \frac{V}{(X_c - X_L)} \quad (4.9)$$

Considerando:

I = máxima corrente na frequência fundamental que pode atravessar os elementos do filtro (Ampères)

V = tensão máxima de operação do sistema em que o filtro será conectado (Volts)

X_c = reatância do capacitor na frequência fundamental (Ohms)

X_L = reatância do indutor na frequência fundamental (Ohms)

Na equação (4.9), substituindo os módulos das reatâncias do capacitor e do indutor e o valor da tensão máxima nos terminais do filtro, de 248,4V, obtida na simulação, verifica-se que a corrente máxima que atravessa os reatores é de 134,1A. Este valor é bastante próximo ao identificado na simulação para a corrente que ultrapassa os elementos do filtro na frequência fundamental, de 134,3A.

A simulação revelou que a distorção total na corrente absorvida pelos elementos do filtro é de 45,5%, sendo que o espectro harmônico em porcentagem é identificado na

tabela (4.1), enquanto o conteúdo harmônico de corrente esperado é apresentado na tabela (4.9).

Tabela 4.9 Conteúdo harmônico de corrente esperado no filtro sintonizado, obtido na simulação.

Ordem Harmônica	Corrente (A)
1	134,3
3	0,1
5	60,1
7	3,8
9	0,1
11	7,1
13	2,7
15	0,1
17	2,4
19	1,0
21	0,1
23	1,0

A partir da simulação, verifica-se que o valor eficaz da corrente esperada no filtro chega a 147,5A, e as tabelas (4.1) e (4.9) revelam que a ordem harmônica com maior conteúdo é a quinta, frequência próxima à de sintonia do filtro, conforme já era esperado. Por margem de segurança, o reator deve ser fabricado para suportar uma corrente de 180A, valor que considera uma distorção total na corrente de aproximadamente 90%.

4.11 Tecnologias para os Elementos do Filtro Sintonizado do CCM-2 e para o Capacitor do CCM-1

4.11.1 Tecnologia dos Capacitores

Conforme cálculos apresentados anteriormente, as correntes às quais os capacitores do filtro sintonizado instalado no CCM-2 devem suportar são bastante elevadas. Por apresentarem uma excelente resposta frente a valores elevados de corrente (SARJEANT, 1998), os capacitores devem ser impregnados “All Film”.

Apesar do custo de implantação de capacitores com esta tecnologia ser mais elevado, eles se mostram consideravelmente mais robustos quando comparados aos de polipropileno metalizado (TEIXEIRA, 2007), o que justifica sua utilização até mesmo no banco de capacitores do CCM-1. O capacitor impregnado “All Film” utilizado nos dois CCM’s é ilustrado na figura (4.16).



Figura 4.16 Capacitor impregnado utilizado no filtro e no capacitor do CCM-1. Fabricante: Iesa Inepar

4.11.2 Tecnologia dos Reatores do Filtro Sintonizado

Os núcleos dos reatores do filtro podem ser a ar ou de ferro, ambos utilizados em aplicações de baixa tensão. A grande vantagem da utilização dos reatores com núcleo de ferro está associada ao seu formato compacto, o que reduz o custo e o espaço exigido na instalação do filtro.

Segundo o trabalho de Resende (2003), reatores com núcleo de ferro podem apresentar ruídos audíveis e perdas consideráveis, porém após melhoria no projeto, já existe tecnologia na fabricação de reatores que permite o seu uso com garantia de operação segura. Já Ahn (2007) alerta para o correto dimensionamento dos reatores com núcleo de ferro, visando à prevenção de problemas de saturação e da variação da sua indutância com temperaturas elevadas.

O fabricante do filtro pode utilizar qualquer uma das duas tecnologias de reatores: com núcleo a ar ou núcleo de ferro, porém caso opte pelo uso da segunda opção, um maior detalhamento na sua especificação deve ser feito, considerando os aspectos descritos.

4.12 Condições Operacionais do Filtro e do Sistema a serem consideradas

Para a correta especificação dos componentes do filtro, o guia IEEE Std 1531-2003 alerta para realização de avaliações das condições operacionais do filtro e do sistema. As características e seus respectivos comentários são listados nas tabelas (4.10) e (4.11):

Tabela 4.10 Condições operacionais do filtro consideradas na simulação

CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO FILTRO	
Queimas de unidades capacitivas, que resultam em uma dessintonia do filtro.	A tecnologia dos capacitores utilizada, impregnada “All Film”, apresenta pouca variação da capacitância ao longo da sua vida útil, desta forma as mesmas não foram consideradas.
Absorção de correntes harmônicas provenientes do sistema (desconhecidas)	Foram consideradas na simulação, visando prevenção de queima dos elementos do filtro.

Tabela 4.11 Condições operacionais do sistema elétrico consideradas na simulação

CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO SISTEMA	
Característica	Comentário
Inclusão de harmônicos característicos e não característicos na análise do sistema e acréscimo de novas cargas não lineares.	A partir da medição de grandezas na entrada dos conversores, os harmônicos característicos e não característicos foram corretamente modelados. A mineradora não tem perspectiva de acréscimo de mais cargas não lineares na sua planta. Porém, a instalação de novos conversores de potência para o CCM-2 foi considerada. Já no CCM-1, a mesma não foi ponderada, uma vez que o inversor de 30cv será desativado.
Sobretensão de 5% considerando condição de carga normal e 10% para condição do sistema sem carga.	Todas essas sobretensões foram consideradas.
Variações na frequência nominal do sistema.	Como não existem, na mineradora, geradores locais e grandes alterações na frequência do Sistema Interligado Brasileiro são raras, foi considerada uma variação nesta grandeza de 0,1Hz.
Variações nas condições das cargas não lineares e no carregamento dos motores.	As condições de carga de conversores são importantes por alterarem os espectros harmônicos injetados no sistema elétrico. Os carregamentos dos motores podem alterar a frequência de ressonância do sistema e caso esta esteja próxima às ordens características, pode-se aumentar a distorção harmônica. Ambos foram considerados na simulação.
Desbalanceamento na tensão do sistema	Como o desequilíbrio desta grandeza já havia sido verificado nas medições, o mesmo foi considerado na simulação do sistema.

4.13 Sequência de Energização dos Bancos e do Filtro Sintonizado

A energização simultânea dos dois capacitores alimentados pelo CCM-1 causará uma variação na tensão do sistema elétrico acima do limite estabelecido por norma, de 3%, desta forma, conforme descrito anteriormente, os mesmos não poderão ser conectados no mesmo momento. Uma análise da sequência de alimentação do banco do CCM-1 e do filtro sintonizado do CCM-2 deverá ser realizada, visando à prevenção de queimas destes dispositivos devido à elevadas distorções harmônicas quando de suas energizações individuais.

Primeiramente, com o objetivo de absorver os harmônicos e reduzir a distorção harmônica nas barras, o filtro sintonizado deverá ser conectado ao sistema. Nesta análise, os valores de corrente e tensão aplicadas aos componentes do filtro tiveram módulos aceitáveis e não provocariam queimas prematuras.

A segunda etapa consistirá no chaveamento do estágio do banco de capacitores do CCM-1 com potência de 100 kVAr e logo depois do capacitor de 75 kVAr. As duas sequências de chaveamento não revelaram grandes variações na distorção harmônica, podendo ser conectado primeiramente ao sistema tanto o banco de 75 kVAr quanto o de 100 kVAr. O tempo de chaveamento entre as etapas será de 30 segundos, tempo suficiente para a redução do transitório no sistema elétrico.

No trabalho de Garcia (2007), foram relatadas sobretensões com consequentes arcos voltaicos nos elementos de proteção do filtro, entre as chaves seccionadoras e os fusíveis, quando de desligamentos e energizações de transformadores e do retorno da energia após interrupções no fornecimento em uma instalação com baixa razão de curto-circuito. Os problemas de sobretensões causados por transitórios no sistema elétrico foram solucionados através da instalação de um temporizador que somente energizará o equipamento 60 segundos após o retorno da energia.

Visando prevenir sobretensões no filtro sintonizado a ser instalado no CCM-2, será exigida a instalação de um temporizador com o mesmo tempo de retardo descrito. Outra função destes dispositivos é de proteger os capacitores contra energizações indevidas, quando ele ainda está carregado, o que reduz a vida útil de elementos responsáveis pela compensação reativa.

4.14 Análise do Desempenho do Filtro Sintonizado

O filtro sintonizado compensou a potência reativa das cargas indutivas alimentadas pelo CCM-2, além de apresentar bons resultados na filtragem dos harmônicos. Outras vantagens obtidas pelo uso destes equipamentos estão relacionadas à sua simplicidade e ao seu baixo custo de implantação comparativamente às outras soluções.

Filtros passivos, porém são extremamente dependentes da impedância da fonte e grandes variações nesta grandeza, fora da tolerância do filtro, podem alterar sua característica de compensação e resultar em uma sobrecarga nos seus componentes.

O aumento de cargas não lineares no sistema elétrico também pode resultar em sobrecargas nos capacitores e indutores dos filtros, outra desvantagem do uso desta solução.

4.15 Outras Soluções Possíveis

A redução da distorção harmônica em barras do sistema elétrico pode ser alcançada através da diminuição de duas grandezas: da injeção de corrente harmônica no sistema ou da impedância da rede.

A impedância do sistema pode ser reduzida através da instalação de filtros sintonizados, solução escolhida no caso em estudo por ter apresentado o melhor custo-benefício, ou a partir do fortalecimento da rede de alimentação. Na mineradora, o aumento da potência de curto-circuito não se mostrou uma boa alternativa por ter reduzido a distorção harmônica de forma significativa apenas no CCM-1 e ter apresentado um alto custo na sua implantação.

Já a redução da injeção de corrente harmônica no sistema elétrico pode ser realizada através da instalação de filtros ativos ou da multiplicação de fases, duas alternativas detalhadas a seguir.

4.15.1 Instalação de Filtros Ativos com o Objetivo de se reduzir a Distorção Harmônica

O princípio de funcionamento do filtro ativo consiste na injeção de corrente harmônica com a mesma magnitude das grandezas geradas pelas cargas não lineares,

porém com fase invertida, liberando no sistema elétrico correntes senoidais, sem distorção harmônica (AHRENS, 2005).

O filtro ativo reduz consideravelmente os harmônicos de baixa ordem, porém seu circuito de chaveamento introduz distorções harmônicas de alta frequência no sistema elétrico. As magnitudes destas distorções são menores que as introduzidas pelas fontes não lineares e podem ser facilmente filtradas pelos componentes do sistema, como transformadores, que se apresentam como impedâncias elevadas para ordens maiores (SUTANTO, 1991). Conforme este mesmo trabalho, os filtros ativos dificilmente podem ser desenvolvidos com grande capacidade estática, apresentando baixas perdas e boa resposta em frequência.

Os filtros ativos reduzem as correntes harmônicas de qualquer ordem e se adaptam às variações na carga, porém seu uso em instalações industriais é limitado, devido ao seu alto custo inicial comparado ao dos filtros passivos, motivo pelo qual os mesmos não foram instalados na mineradora.

4.15.2 Multiplicação de Fases nos Conversores

Com a multiplicação de fases, cargas não lineares geram correntes com baixo conteúdo harmônico no sistema elétrico, uma solução que aumenta a complexidade e o preço das mesmas.

Nessa alternativa, a redução da injeção de correntes harmônicas é alcançada alimentando-se os conversores de seis pulsos através de dois transformadores: um com secundário em delta e outro com secundário em estrela. Com esta instalação, ocorre teoricamente, um cancelamento dos harmônicos de quinta e sétima ordens e o conjunto passa a injetar no sistema apenas as ordens múltiplas de $12 \times n \pm 1$ (para n, um número natural). Desta forma, seriam liberadas apenas as ordens mais elevadas (11° e 13° harmônicos, principalmente) que possuem menor magnitude e podem ser mais facilmente filtradas pelo sistema elétrico.

Na prática, porém, o cancelamento total dos harmônicos de baixa ordem nunca é atingido, devido à desbalanceamentos na tensão de alimentação e na impedância do sistema, erros no ângulo de disparo dos conversores e diferenças entre as impedâncias dos transformadores (STRATFORD, 1981).

Geralmente, cada carga não linear é alimentada por dois transformadores com secundários delta e estrela, porém como no caso em estudo o sistema está em funcionamento, o alto custo envolvido inviabiliza esta solução.

Conforme o trabalho de Almonte (1995), em sistemas em funcionamento, uma das maneiras de se implementar a multiplicação de fases é a partir da alimentação, de forma mais igualitária possível, de alguns inversores através de um transformador com secundário em delta e de outros inversores através de um transformador com secundário em estrela. Porém, a mitigação dos harmônicos de baixa ordem somente é atingida caso as potências transmitidas pelos dois transformadores sejam idênticas em magnitude e os conversores estejam produzindo conteúdos harmônicos semelhantes. Como, normalmente, as cargas individuais operam em pontos diferentes, há uma redução ineficaz dos 5º e 7º harmônicos, e a filtragem harmônica ainda é necessária. Desta forma, a solução proposta não se mostra interessante no estudo de caso.

4.16 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as modelagens utilizadas para representação das principais cargas da indústria no programa de harmônicos, Superharm. As potências reativas mais usuais dos bancos de capacitores dos CCM's, obtidas a partir das medições, foram simuladas e as distorções harmônicas devidamente identificadas. Visando mitigar as distorções harmônicas, foram discutidas a instalação de um filtro ativo, multiplicação de fases e o aumento da potência de curto-circuito, sendo a instalação do filtro sintonizado na barra com maior injeção de corrente harmônica no sistema, a alternativa que apresentou o melhor custo-benefício.

Identificou-se que a causa dos níveis elevados de distorções harmônicas verificados no CCM-1, que possui em seu quadro de cargas uma proporção pequena de cargas não lineares, é a absorção de harmônicos provenientes do CCM-2. A instalação do filtro na barra com maior injeção de harmônicos reduziu a distorção no CCM-1 ao reduzir a interligação entre as barras. As especificações e as características técnicas dos elementos do filtro foram discutidas, bem como o desempenho da solução na mitigação dos harmônicos. Foi verificada que a distribuição de capacitores em barras próximas resulta na existência de várias frequências de ressonância. Adicionalmente, foram analisadas as influências que a potência de curto-circuito e a relação X/R da rede

exercem na impedância e nas distorções harmônicas das barras em análise, a partir da variação dos parâmetros da rede de alimentação.

CONCLUSÕES FINAIS E PROPOSTAS DE EXTENSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de caso em que a inclusão de cargas não lineares em uma instalação elétrica com baixa potência de curto-circuito resultou na queima de capacitores com tecnologia PPM conectados a duas barras do sistema. Com o objetivo de mitigar tal problema, soluções como a instalação de um filtro ativo, multiplicação de fases e aumento da potência de curto-circuito foram analisadas e a instalação de um filtro sintonizado na barra com maior injeção de corrente harmônica foi a alternativa que apresentou o melhor custo-benefício. Uma análise da influência da impedância da rede de alimentação nas distorções harmônicas e nas impedâncias das barras da indústria de pequeno porte foi realizada, a partir da alteração da potência de curto-circuito e da relação X/R da mesma.

Na mineradora, a instalação de cinco conversores de frequência no CCM-2 resultou nas queimas dos capacitores responsáveis pela correção do fator de potência em dois CCM's. As medições nas barras indicaram que a causa mais provável para as queimas precoces dos capacitores de polipropileno metalizado (PPM) foi a sobrecorrente harmônica que atravessava os dispositivos. A partir do estudo das características dos capacitores com tecnologia PPM, pode-se concluir que estes dispositivos se mostram extremamente vulneráveis ao estresse de natureza térmica e não devem ser utilizados em aplicações que demandam correntes harmônicas elevadas.

Nas medições realizadas nos CCM's 1 e 2, foram verificados níveis bastante elevados de distorções harmônicas na tensão das duas barras, superiores aos níveis de referência estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST. Com o objetivo de identificar os carregamentos e os espectros harmônicos injetados pelos conversores de frequência no sistema elétrico, foram realizadas medições na entrada dos equipamentos. Nelas, foram identificadas injeções de harmônicos de ordem tripla, os mesmos são resultado do alto nível de distorção harmônica e do considerável desequilíbrio nas tensões de alimentação. Já os harmônicos de ordens pares são resultado do alto nível de distorção harmônica e possuíram valores desprezíveis, eles alertaram, porém, para um mau funcionamento dos equipamentos. Todas as medições realizadas na entrada dos conversores foram utilizadas na modelagem das cargas não lineares na simulação do sistema elétrico da indústria no programa de harmônicos Superharm.

A partir das simulações, identificou-se que a principal causa das queimas precoces dos capacitores do CCM-1, barra que não possuía fontes não lineares significativas, pode ser atribuída à absorção da distorção harmônica proveniente do CCM-2. A grande interligação entre as duas barras é resultado da baixa potência de curto-circuito local, e a instalação do filtro sintonizado no CCM-2 mitigou o problema de harmônicos no primeiro CCM ao diminuir a impedância de transferência entre duas as barras.

No CCM-2, visando à absorção da corrente harmônica e a correção do fator de potência, foi necessária a instalação de um filtro sintonizado na frequência com maior injeção de corrente harmônica no sistema elétrico, a quinta. Esta alternativa atingiu todos os propósitos descritos com um baixo custo de implantação e uma notória simplicidade, porém caso ocorram alterações significativas na impedância da rede de alimentação ou um aumento de cargas não lineares no sistema elétrico, os componentes dos filtros poderão apresentar sobrecarga.

O filtro sintonizado absorverá as correntes harmônicas, desta forma seus componentes foram especificados para suportar correntes bastante elevadas. Os capacitores devem ser impregnados “All Film”, tecnologia mais robusta quando comparada à PPM, e na especificação de suas características, a elevação da tensão em seus terminais proveniente da inserção do reator foi considerada.

As simulações revelaram que o aumento da potência de curto-circuito da mineradora reduz drasticamente a distorção no CCM-1, ao criar um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas injetadas no sistema elétrico pelos conversores instalados no CCM-2. Esta alternativa resolveria o problema das queimas dos capacitores no primeiro CCM, porém não foi selecionada pelo fato de não diminuir de forma significativa a distorção harmônica no CCM-2 e ter um custo de implantação bastante elevado.

Verificou-se também que a distribuição de capacitores em barras próximas resulta na presença de várias frequências de ressonância com módulos menores que as originais, o que aumenta a complexidade do sistema em análise. Porém, o aumento da potência de curto-circuito funciona como um desacoplamento entre as ramificações, reduzindo na barra a influência exercida por capacitores instalados em outros locais.

Através das análises realizadas, pode-se concluir que preocupação com a danificação de equipamentos elétricos devido ao excesso de harmônicos não se restringe à existência de cargas não lineares próprias ao consumidor, e deve ser estendida à

alimentação de cargas não lineares por consumidores instalados em barras próximas, principalmente em locais com baixa potência de curto-circuito.

A partir das simulações, identificou-se também que os efeitos da elevação da relação X/R da impedância da rede de alimentação são os de aumentar e reduzir os módulos da impedância da barra em análise nas ressonâncias paralela e série, respectivamente, reduzindo a banda passante. Na existência de várias frequências de ressonância, as frequências com ordens menores se mostraram mais dependentes da relação X/R da impedância da rede de alimentação, ao apresentarem os efeitos descritos mais pronunciados, quando comparados aos resultados obtidos nas frequências de ressonância com ordens mais elevadas.

Na mitigação dos harmônicos, a instalação de um filtro ativo e a multiplicação de fases nos conversores também foram analisadas, porém ambas alternativas foram descartadas por apresentarem custos de implantação bem superiores ao do filtro passivo instalado no CCM-2.

Visando à análise da influência que a impedância da rede de alimentação exerce nas distorções harmônicas e nas impedâncias de transferência entre as barras de qualquer consumidor com baixa razão de curto-circuito, poderão ser realizados estudos em indústrias de pequeno, médio e grande portes que apresentem problemas relacionados a queimas de capacitores devido à elevada distorção harmônica e à baixa razão de curto-circuito. Esta análise é uma proposta de continuação para futuros trabalhos sobre este tema.

APÊNDICE

Este apêndice tem o objetivo de apresentar as principais características da instalação elétrica da indústria de pequeno porte do estudo de caso.

A. Dados da rede de alimentação da indústria

A energia elétrica é entregue para a indústria de pequeno porte em 13,8kV e os dados das correntes de curto-circuito fornecidos pela concessionária são apresentados na tabela (A.1). A relação X/R da rede de alimentação, definida como a razão entre a reatância indutiva e a resistência da rede, é de 0,6 e resultado da pequena bitola dos condutores que alimentam o consumidor.

Tabela A.1 Dados da rede de alimentação da indústria

Corrente de curto-circuito trifásica: $277A\angle-31,37^\circ$
Corrente de curto-circuito monofásica: $170A\angle-29,78^\circ$

Como a potência instalada em cargas na indústria é de 1,6MVA, e a potência de curto-circuito no ponto de entrega é de 6,6MVA, a instalação apresenta uma baixa razão de curto-circuito (de apenas 4,1), definida como o quociente entre a potência de curto-circuito e a potência instalada.

B. Dados internos a indústria

A mineradora apresenta uma potência instalada de 1,6MVA, dividida em dois transformadores de 300kVA e dois de 500kVA. O diagrama unifilar simplificado da indústria é apresentado na figura (A.1):

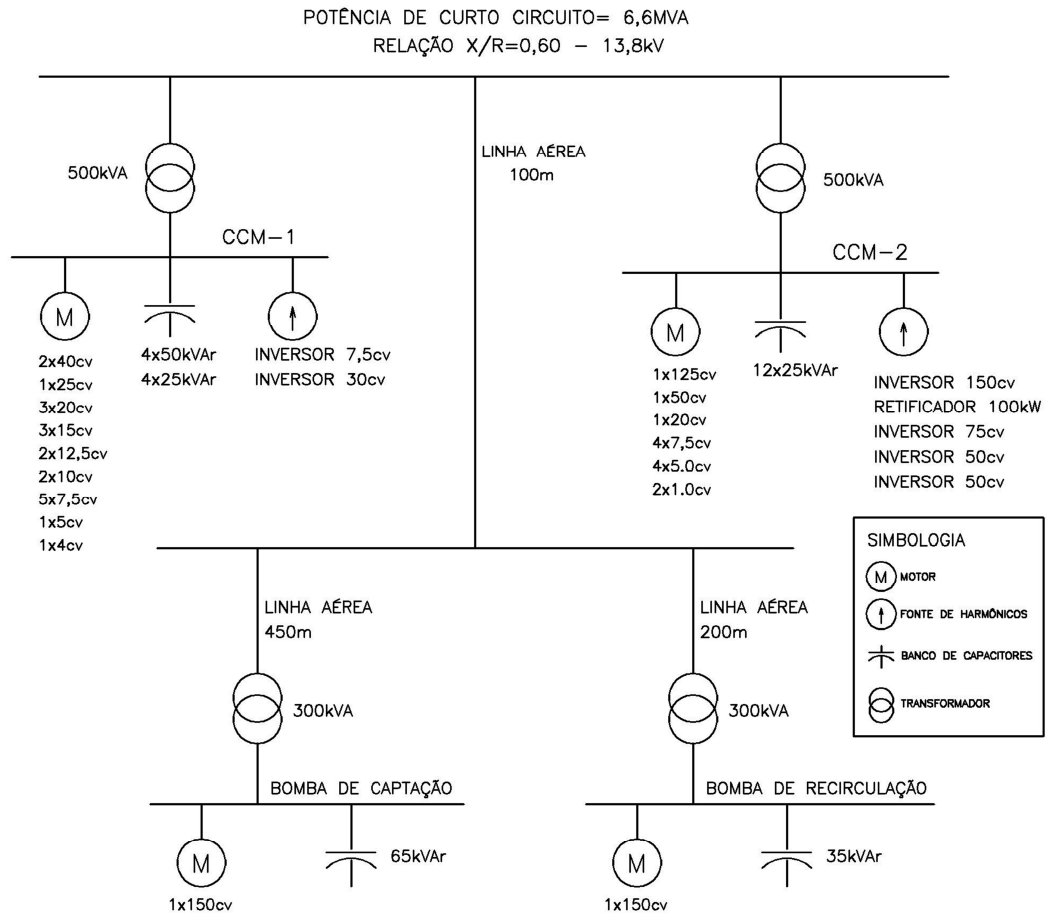


Figura A.1. Diagrama unifilar simplificado da indústria.

Os dois transformadores de 500kVA são responsáveis pela alimentação elétrica dos CCM's 1 e 2 e estão localizados a 10m do ponto de entrega da energia. A especificação técnica dos transformadores de 500kVA é apresentada na tabela (A.2)

Tabela A.2 Especificação técnica dos transformadores de 500kVA.

Potência nominal: 500kVA
Tensão primária: 13,8kV
Tensão secundária: 440V
Impedância: 4,7%
Relação X/R: 4,7
Conexão do primário: delta
Conexão do secundário: estrela

O CCM-1 possui em seu quadro de cargas 20 motores e dois inversores que alimentam cargas motoras de 7,5 e 30cv. A tabela (A.3) apresenta a quantidade e a potência dos motores alimentados por este CCM:

Tabela A.3 Quantidade e potência dos motores alimentados pelo CCM-1.

Quantidade	Potência (cv)
2	40
1	25
3	20
3	15
2	12,5
2	10
5	7,5
1	5
1	4

O CCM-2 é responsável pela alimentação elétrica de 13 motores (apresentados na tabela (A.4)) e cinco conversores de frequência que alimentam cargas motoras de potências: 150cv, 100kW, 75cv e duas de 50cv, somando uma proporção bastante considerável de 65% de cargas não lineares.

Os bancos de capacitores responsáveis pela correção dos fatores de potência dos CCM's são automáticos e possuem potências reativas totais de 300kVAr, divididas em quatro estágios de 25kVAr e quatro de 50kVAr para o CCM-1 e doze estágios de 25kVAr para o CCM-2. Em ambos os bancos a tensão nominal dos capacitores é igual à do sistema: de 440V.

Tabela A.4 Quantidade e potência dos motores alimentados pelo CCM-2.

Quantidade	Potência (cv)
1	125
1	50
1	20
4	7,5
4	5
2	1

O transformador de 300kVA que alimenta a bomba de captação está localizado a 550m do ponto de entrega da energia, alimenta um motor de 150cv e possui um banco de capacitores com potência reativa total de 65kVAr, com tensão igual à do sistema: de 440V.

O motor da bomba de recirculação é de 150cv e é alimentado por um transformador de 300kVA (localizado a 300m do ponto de entrega da energia elétrica). O banco de capacitores responsável pela correção do fator de potência da barra possui potência de 35kVAr e tensão nominal de 440V.

A especificação técnica dos dois transformadores de 300kVA é apresentada abaixo:

Tabela A.5 Especificação técnica dos transformadores de 300kVA.

Potência nominal: 300kVA
Tensão primária: 13,8kV
Tensão secundária: 440V
Impedância: 4,2%
Relação X/R: 4,7
Conexão do primário: delta
Conexão do secundário: estrela

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ABNT, 1977) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5060**: Guia para Instalação e Operação de Capacitores de Potência. Procedimento. Rio de Janeiro, 1977

(ABNT, 2009) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. Rio de Janeiro, 2009

(AHN, 2007) Ahn S. U.; Camargo J.; Marcelino D. S.; Nogueira, N. R.; Garcia F. R.; Naves A. C.; Gouvêa M. R.; **Utilização de Filtros Harmônicos Passivos em Redes Secundárias de Distribuição: Tecnologia e Desempenho**. VII Conferência sobre Qualidade da Energia da Elétrica. Santos, SP. 2007.

(AHRENS, 2005) Ahrens, M.; Konstantinovic, Z. **Harmonic Filters and Power Factor compensation for Cement Plants**. Conference Record Cement Industry Technical Conference, 2005. p. 77, 15-20 May 2005.

(ALLEGGRANZA, 2007) Allegranza, V.; Ardito, A.; Berardinis, E. de; Delfanti, M.; Schiavo L. lo. **Assessment of Short Circuit Power Levels in HV and MV Networks with respect to Power Quality**. 19th International Conference on Electricity Distribution. Paper 0161, Vienna, 21-24 May 2007.

(ALMONTE, 1995) Almonte, R.; Ashley, A. **Harmonics at the Utility Industrial Interface: A real world example**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 31, p. 1419-1426, Nov./Dez. 1995.

(ANDREWS, 1996) Andrews, D.; Bishop, M.T.; Witte, J.F. **Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 32, p. 617, May/Jun 1996.

(ANEEL, 2009) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 395**: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8, revisão 1. Brasília, 2009.

(ANEEL, 2010) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 414**. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, 2010.

(ARRILAGA, 2003) Arrilaga, J.; B; Watson, N. R. **Power System Harmonics**. 2nd ed., John Willey and Sons, 2003.

(BLOOMING, 2005) Blooming Thomas M. **Capacitor Failure Analysis: A troubleshooting case study**. Conference Record Cement Industry Technical Conference, P. 345, 15-20 May 2005

(BLOOMING, 2008) Blooming, T.M.; Carnovale, D.J. **Capacitor Application Issues**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 44, p. 1013 – 1026, July-aug. 2008.

(BOICOURT, 1970) Boicourt, G. **Problems in the Design and Manufacture of Energy Storage Capacitors**. Los Alamos Scientific Lab., NM, Rep. LA-4142-MS, Jan. 1970.

(BONNER, 1995) Bonner, J.A.; Hurst, W.M.; Rocamora, R.G.; Dudley, R. F.; Sharp, M.R. Twiss, J.A. **Selecting Ratings for Capacitors and Reactors in Applications Involving Multiple Single-tuned Filters**, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, P. 547, Jan. 1995

(BUDDINGH, 2003) Buddingh, Paul C. **Even Harmonic Resonance- An unusual problem**. IEEE Transactions on Industry Applications, p. 1181-1186, july-aug. 2003

(CAMPOS, 2009) Campos, R.; Lacerda, D.; Yanase, M.; Alves, M. **Contribuição a Especificação de Reatores com Núcleo de Ar e Correto Dimensionamento de Filtros de Harmônicos**. Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, 2009. Puerto Iguazú, Argentina. 24-28 Mayo 2009

(CIVIDINO, 1992) Cividino, L. **Power Factor, Harmonic Distortion: Causes, effects and considerations**. 14th International Telecommunications Energy Conference, 1992. Washington, DC. p. 506, 4-8 Oct 1992.

(DIAS, 2002) Dias, G. A. **Harmônicas em Sistemas Industriais**, 2. ed., Porto Alegre, 2002.

(DUARTE, 2002) Duarte, L.; Alves, M. **The Degradation of Power Capacitors under the Influence of Harmonics**. 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002. v. 1, p. 334. 6-9 Oct. 2002.

(DUGAN, 2004) Dugan, R.; McGranaghan, M.; Santoso, S.; Beaty, H. **Electrical Power System Quality**, 2nd ed. McGraw-Hill Company, 2004.

(EMBRASUL, 2005) Embrasul Indústria Eletrônica LTDA. **Manual de Instalação e Operação - Analisador de Energia RE-6000- Revisão A7**. Porto Alegre, RS. Aprovado em Nov. 2005.

(GARCIA, 2001) Garcia, F. R.; Naves, A. C., **Cálculo da Perda de Vida Útil de Capacitores em Função da Distorção Harmônica Existente nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica**, IV Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Porto Alegre,RS. 2001.

(GARCIA, 2005) Garcia, F. R. **Efeitos Harmônicos da Aplicação de Bancos de Capacitores em Indústrias Eletrointensivas sobre a Rede Elétrica de Alta Tensão – Casos reais**. VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica. Belém, Pará. 2005.

(GARCIA, 2007) Garcia, F.; Santos, T.; Mertens, E.; Benichio, V.; Dias, L. **A Solução de Problemas com Harmônicos em um Cliente Industrial: Uma cooperação entre concessionária e consumidor**. VII Conferência sobre Qualidade da Energia da Elétrica. Santos, SP. 2007.

(GIRGIS, 1992) Girgis Adly A.; Fallon, C.M., Rubino, J.C.; Catoe, R.C. **Harmonics and Transient Overvoltages due to Capacitor Switching**. Papers Presented at the 36th Annual Conference Rural Electric Power Conference, 1992. New Orleans, LA. p. B1/1, 3-5 May 1992.

(H-L, 2006) H-L, Jou et al. **Simplified Method for Protecting the Power Capacitor from Over-voltage/Over-current**. EPES. p. 215-220. 2006.

(HUANG, 2003) Huang Zhenyu; Xu, Wilsun; Dinavahi, V.R. **A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18, p. 1382, Oct. 2003

(IEEE(1), 1992) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Std 519-1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. New York, 1992

(IEEE(2), 1992) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Std 1036-1992: Guide for Application of Shunt Power Capacitors**. New York, 1992

(IEEE, 1994) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants** IEEE Standards Board. New York, 1994.

(IEEE, 2002) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Std 18TM-2002: IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**. New York, 2002

(IEEE, 2003) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **IEEE Std 1531-2003: Guide for Application and Specification of Harmonic Filters**. New York, 2003

(KINGSTON, 1994) Kingston, R.; Baghzouz, Y. **Power Factor and Harmonic Compensation in Industrial Power Systems with Nonlinear Loads**. Papers Presented at the 1994 Annual Meeting Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Irvine, CA. p. 235, 1-5 May 1994.

(KIMG, 2009) Kimg Jong-Gyeum; Park Young-Jeen; Lee Dong-Ju; Kim Il-Jung. **Voltage and Current Characteristics Analysis of Passive Filter**, 31st International Telecommunications Energy Conference, 2009. Incheon. p. 1, 18-22 oct. 2009.

(KNESCHKE, 1999) Kneschke, T.A. **Distortion and Power Factor of Nonlinear Loads**. Proceedings of the Railroad Conference 1999 ASME/IEEE, 1999. Dallas, TX. p. 47, 1999.

(KOMIN, 1991) Komin, S.; Morozov, E.; Fedorova, V. **The Effects of Surface Active Agents on Electric Strength of High-Voltage Capacitors Insulation**. Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991. Tokyo. p. 470. 8-12 Jul 1991.

(KROS, 1997) Kros, R. **Capacitors in Power Electronic Applications**. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference, 1997. New Orleans, LA. v. 2, p. 1101, 5-9 Oct 1997

(LEE, 1998) Lee C.; Lee W.; Wang Y.; Gu, J. **Effects of Voltage Harmonics on the Electrical and Mechanical Performance of a Three-Phase Induction Motor**. 1998 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Edmonton, Alta. p. 88-94, 3-8 May 1998.

(MAMEDE, 2001) Mamede, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 6. ed., Rio de Janeiro, LTC: 2001. cap. 4, p. 150-151.

(MCGRANAGHAN, 1998) McGranaghan, M. **Overview of the Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems-IEEE P519A**. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1998. Proceedings. Athens. v. 1, p. 462, 14-18 Oct 1998.

(MOORE, 1977) Moore, A. **Application of Power Capacitors to Electrochemical Rectifier Systems**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. IA-13, p. 399-406, Sept. 1977

(NEMAMCHA) Nemamcha, M.; Gosse, J.; Gosse, B. **Discharges in All-PP Film Model Capacitors**. IEEE Transactions on Electrical Insulation. v. 28, p. 315. Jun 1993.

(NUCCI, 1991) Nucci, C. A.; Pirani, S.; Rinaldi, M. **Pulse Withstand Capability of Self-healing Metalized Polypropylene Capacitors in Power Applications**. IEEE Transactions on Electrical Insulation. v. 26, p. 146 – 155. Feb, 1991.

(ORTMEYER, 1985) Ortmeyer, T.; Chakravarthi, K.; Mahmoud, A. **The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. v. PAS-104, p. 2555, Sept. 1985.

(PAULINO, 1985) Paulino, J. O. S. **Influências de Curtos-circuitos nas Redes de Distribuição sobre Redes Telefônicas em Uso Mútuo de Posteação**. 18 de dezembro de 1985. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1985.

(RESENDE, 2003) Resende J. W.; Samesima M. I.; Gomes D. B. **Desenvolvimento e Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição – Parte 2**. V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Aracaju, SE. 2003.

(RICE, 1986) Rice, D. **Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics- Their effect on power systems components**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. IA-22 , p. 161 – 177, Jan. 1986.

(RODRIGUES, 2009) Rodrigues, J. **Interferência de Harmônicas em Equipamentos de Medição de Energia Elétrica**. 2009. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009

(SARJEANT, 1998) Sarjeant, W.; Zirnheld, J.; MacDougall, F. **Capacitors**. IEEE Transactions on Plasma Science. v. 26, p. 1368. Oct 1998.

(SCHNEUWLY, 1998) Schneuwly, A.; Gröuning, P.; Schlapbach, L. **Breakdown Behavior of Oil-impregnated Polypropylene as Dielectric in Film Capacitors**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 5, p. 862 – 868. Dec 1998.

(SEBILLOTTE, 1991) Sebillotte, E.; Theoleyre, S.; Said, S.; Gosse, B.; Gosse J. **All Film Power Capacitors - Degradation under alternating electrical stress of Impregnated Polypropylene Films; effect of the epoxide additive**. Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991. Tokyo, Japan. v. 2, p. 740 – 744. 8-12 Jul 1991.

(SHWEHDI, 2000) Shwedhi, M.H.; Sultan, M.R. **Power Factor Correction Capacitors: Essentials and cautions**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. Seattle, WA, USA. v. 3, p. 1317 – 1322, 2000.

(SIEMENS, 2004) Siemens. **Capacitores para C. F. P.** Set. 2004. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br/upfiles/1944.pdf>>. Acesso em 29 jan. 2011.

(SILVA, 2009) Silva, M. **Correção do Fator de Potência de Cargas Industriais com Dinâmica Rápida**, 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1985.

(SIMONI, 1993) Simoni, L.; Mazzanti, G.; Montanari, G.; Lefebvre, L. **A General Multi-stress Life Model for Insulating Materials with or without Evidence for Thresholds**. IEEE Transactions on Electrical Insulation. v. 28, n. 3. June, 1993.

(SIMPSON, 2004) Simpson Ronald H. **Misapplication of Power Capacitors in Distribution Systems with Non-Linear Loads- Three Case Histories**. Conference Record of the 2004 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. P. 156, 27 june-1 july 2004.

(STRATFORD, 1981) Stratford, R. **Analysis and Control of Harmonic Current in Systems with Static Power Converters**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. IA-17, p. 71–81, Jan. 1981.

(SUBJAK, 1990) Subjak S.; Mcquilkin, J. **Harmonics-Causes, Effects, Measurements and Analysis: An update**. IEEE Transactions on Industry Applications. v. 26, p. 1034-1042, Nov./Dez. 1990.

(SUHETT, 2008) Suhett, M. **Análise de Técnicas de Medição de Potência Reativa em Medidores Eletrônicos**, Março de 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008

(SUTANTO, 1991) Sutanto, D.; Bou-rabee, M.; Tam, K.S.; Chang, C.S. **Harmonic Filters for Industrial Power Systems**. International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991. p. 594, 5-8 Nov 1991.

(TANAKA, 1998) Tanaka, T.; Koshio, N.; Akagi, H.; Nabae, A. **Reducing Supply Current Harmonics**. IEEE Industry Applications Magazine. v. 4, p. 31, Sep/Oct 1998.

(TEIXEIRA, 2007) Teixeira, M.; Peniche, R.; Paulillo, G.; Aoki, A.; Pereira, O.; Biazon, R. **Análise da Vida Útil de Bancos de Capacitores Submetidos a Tensões não Senoidais**. VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE, 2007, Santos.

(WEG, 2011) Weg, software. **Harmonic Calculator WEG-V1_00**. Jaraguá do Sul, SC. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geral/Central-de-Downloads>>. Acesso em: 28 jan. 2011.

(WU, 2002) Wu, Chi-Jui; Huang, Cheng-Ping; Fu, Tsu-Hsun; Zhao, Tzu-Chih; Kuo, Hung-Shian. **Power Factor Definitions and Effect on Revenue of Electric Arc Furnace Load**. International Conference on Power System Technology, 2002. Proceedings. p. 93, 13-17 Oct 2002.

(XIN, 2000) Xin, D.; Fuchang, L.; Jin, L.; Zonggan, Y.; Nanyan, W. **Influence Factors for the Self-healing of Metallized Polypropylene Capacitors**. 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, BC. v. 2, p. 461 – 465, 2000.

(YOSHIDA(1), 1986) Yoshida, Y.; Nishimatsu M. **Power Capacitors**. IEEE Transactions on Electrical Insulation. v. EI-21, p. 963-973. Oxford, UK. Dec. 1986

(YOSHIDA(2), 1986) Yoshida, Y.; Yamanaka, K.; Matsunaga K.; Sato, K.; Kano J.; Umemura, T.; Hayashi, Y. **Status Quo of Self-Healing Film Power Capacitors in Japan**. CIGRE paper 15-04, Paris, 1986.