



Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica:
Ênfase em Qualidade de Energia Elétrica

Análise e Correção de Distorções Harmônicas em um Sistema Elétrico Industrial – Estudo de Caso

Paulo Henrique Cenachi Porto

Belo Horizonte
2012

Paulo Henrique Cenachi Porto

Estudo de Caso - Análise e Correção de Distorções Harmônicas em um Sistema Elétrico Industrial

Trabalho científico apresentado ao curso de
Especialização em Sistemas de Energia
Elétrica - Qualidade de Energia Elétrica da
Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Eduardo Nohme Cardoso

Belo Horizonte

2012

Paulo Henrique Cenachi Porto

Estudo de Caso - Análise e Correção de
Distorções Harmônicas em um Sistema Elétrico
Industrial

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade de Energia apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica – Qualidade da Energia Elétrica.

Belo Horizonte, 22 de Março de 2012.



Prof. Eduardo Nohme Cardoso

Orientador



Prof. Selênio Rocha Silva

Relator

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força e perseverança para progredir de forma eficaz para a conclusão deste curso.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio prestados.

Aos meus mestres, que me passaram conhecimento possibilitando-me realizar este trabalho com sucesso.

À SMA Sistemas Elétricos, em especial ao Eng. Severino Macedo, pelos ensinamentos e oportunidade de aplicar na prática os conceitos e teorias aprendidos.

“As pessoas que vencem nesse mundo são as que procuram as circunstâncias de que precisam e, quando não as encontram, as criam.”

Winston Churchill

RESUMO

Este trabalho apresenta o impacto da utilização de cargas não lineares na distorção harmônica de um sistema industrial, onde são propostas correções capazes de melhorar sua qualidade de energia. Engloba cargas não lineares, ressonância, harmônicos de tensão e corrente, e filtros harmônicos sintonizados.

Palavras-chave: distorção harmônica, cargas não lineares, qualidade de energia.

ABSTRACT

This document presents the impact of using non linear loads on the harmonic distortion of an industrial system, proposing solutions that improve its quality of energy. The study covers non-linear loads, resonance, harmonic voltage and current, and harmonic filters.

Keywords: harmonic distortion, non linear loads, energy quality.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Forma de onda resultante (T) da corrente fundamental (1) e sua quinta harmônica (5)	3
Figura 2 - Composição básica dos conversores de frequência	7
Figura 3 - Corrente na entrada do conversor, sem reatância de entrada (a) e com reatância de entrada (b)	8
Figura 4 - Representação da modelagem de conversores de frequência	8
Figura 5 - Circuito paralelo ressonante	17
Figura 6 - Filtros harmônicos: sintonizado ou passa-faixa (a), passa-altas (b), tipo C (c) e tipo Pi (d)	20
Figura 7 - Comparação entre as respostas em frequência dos filtros sintonizado e passa-altas	21
Figura 8 - Módulo da impedância de um circuito RLC série versus frequência	22
Figura 9 - Ângulo da impedância de um circuito RLC série versus frequência	23
Figura 10 - Exemplo de fatores de qualidade distintos para um mesmo filtro	23
Figura 11 – Diagrama unifilar simplificado do sistema em questão	25
Figura 12 – Analisador de Energia RE6000 da EMBRASUL	30
Figura 13 - Esquemas de ligação do RE6000 à rede	30
Figura 14 – Localização dos aparelhos durante a realização das medições	31
Figura 15 – Medições de tensão e corrente na entrada do CCM Britagem	34
Figura 16 – Medições de potências ativa e reativa e fator de potência na entrada do CCM Britagem	35
Figura 17 – THDv medido na entrada do CCM Britagem	36
Figura 18 – Medições de tensão e corrente na entrada do CCM Concentração	39
Figura 19 – Medições de potências ativa e reativa e fator de potência na entrada do CCM Concentração	40
Figura 20 – THDv medido na entrada do CCM Concentração	41
Figura 21 – Resultados obtidos para a configuração 0	44
Figura 22 – Resultados obtidos para a configuração 1	46
Figura 23 – Resultados obtidos para a configuração 2	47
Figura 24 – Gráfico impedância x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)	48

Figura 25 – Espectro de harmônicos - tensão x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho).....	49
Figura 26 – Gráfico da forma de onda de tensão nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho).....	49
Figura 27 - gráfico impedância x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho).....	51
Figura 28 - Espectro de harmônicos - tensão x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho).....	51
Figura 29 - Gráfico da forma de onda de tensão nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho).....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem e frequência das harmônicas ímpares	4
Tabela 2 - Efeitos relacionados à sequência das harmônicas.....	4
Tabela 3 - Níveis de referência para DTTh%	10
Tabela 4 - Níveis de referência para DITh%	11
Tabela 5 - Níveis de referência para distorções harmônicas de tensão	12
Tabela 6 - Níveis de compatibilidade para distorção harmônica total	13
Tabela 7 - níveis de compatibilidade para harmônicos individuais.....	13
Tabela 8 – Limites de distorções harmônicas de tensão.....	14
Tabela 9 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas até 69kV.....	15
Tabela 10 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas acima de 69kV	16
Tabela 11 – Espectro harmônico de inversores de frequência/retificadores de 6 pulsos.....	28
Tabela 12 – Bancos de capacitores do sistema elétrico da MSM	29
Tabela 13 - Níveis de THDv nas barras do sistema	49
Tabela 14 - Níveis de THDv nas barras do sistema	52
Tabela 15 - Taps recomendados para os transformadores principais, conforme alternativas estudadas	53
Tabela 16 - Quedas de tensão calculadas para os taps recomendados.....	53

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Distorção harmônica total de tensão DTTh%.....	9
Equação 2 - Distorção harmônica individual de tensão DITh%.....	10
Equações 3 e 4 - Distorção de tensão harmônica total DTHT	12
Equação 5 – Nível de distorção harmônica total - THDv	14
Equação 6 – Nível de distorção harmônica total de corrente - THDi ou TDD	16
Equações 7 e 8 - Relação entre indutância e capacitância.....	18
Equações 9 e 10 - Frequência de ressonância	18
Equação 11 – Frequência de ressonância	18
Equação 12 – Frequência de sintonia do filtro	22

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II – DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	3
2.1 Conceituação	3
2.2 Geração de Distorções Harmônicas.....	5
2.3 Limites para os Níveis de Distorções Harmônicas	9
2.3.1 ANEEL – Prodist	9
2.3.2 ONS – Procedimentos de Rede	11
2.3.3 IEC 1000 parte 2, seção 4.....	12
2.3.4 IEEE-519.....	14
2.3.5 Ressonância	17
2.4 Filtros Harmônicos.....	19
CAPÍTULO III – DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DO SISTEMA ANALISADO	24
3.1 Fator de Potência	24
3.2 Variações de Tensão.....	24
3.3 Limites de Distorções Harmônicas	24
3.4 Características do Sistema Elétrico Analisado	24
3.5 Fontes de Energia	26
3.6 Aterramento do Sistema.....	26
3.7 Transformadores de Força	26
3.8 Fator de Demanda e Diversidade das Cargas	27
3.8.1 Motores e Cargas de Baixa Tensão.....	27
3.8.2 Compensação de Reativos do Sistema	29
3.8.3 Cabos de Média e Baixa Tensão	29
3.9 Medições Realizadas	29
3.9.1 Instrumento Utilizado.....	29
3.9.2 Pontos de Realização das Medições	31
3.9.3 Resultados das Medições	32
CAPÍTULO IV – SIMULAÇÕES, RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES	42
4.1 Etapas de Processamento	42
4.2 Etapa 1 - Verificação e Correção do Fator de Potência Geral do Sistema.....	43
4.2.1 Configuração 0 - Fator de Potência Natural do Sistema.....	43
4.2.2 Configuração 1 - Bancos de Capacitores (Configuração Atual)	45
4.2.3 Configuração 2 - Utilização de Filtros Harmônicos	47
4.3 Etapa 2 - Análise da Ressonância Paralela e Distorções Harmônicas no Sistema.....	48
4.3.1 Configuração 1 - Condição Atual	48
4.3.2 Configuração 2 – Recomendação: Instalação de Filtros Harmônicos.....	50
4.4 Etapa 3 - Análise das Quedas de Tensão e Ajuste de Taps dos Transformadores.....	53
CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	54
CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO.....	56

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS FILTROS HARMÔNICOS	59
8.1 Especificação Técnica do Filtro Harmônico de 100kVAr Sintonizado na 5ª Ordem.....	59
8.1.1 Descrição Geral do Filtro.....	59
8.1.2 Condições do Sistema Elétrico	59
8.1.3 Condições Ambientais.....	59
8.1.4 Capacitores	59
8.1.5 Reatores.....	60
8.1.6 Diagrama Unifilar Orientativo	60
8.2 Especificação Técnica do Filtro Harmônico de 200kVAr Dessintonizado - Configuração 2	61
8.2.1 Descrição Geral do Filtro.....	61
8.2.2 Condições do Sistema Elétrico	61
8.2.3 Condições Ambientais.....	61
8.2.4 Capacitores	61
8.2.5 Reatores.....	62
8.2.6 Diagrama Unifilar Orientativo	62
ANEXO B – DIAGRAMAS UNIFILARES DE FLUXO DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	63
9.1 Configuração 1	63
9.2 Configuração 2	64
ANEXO D – RELATÓRIOS DE FLUXO DE POTÊNCIA	65
10.1 Configuração 1	65
10.2 Configuração 2	68
ANEXO E – RELATÓRIOS DE ANÁLISE DE HARMÔNICOS	71
11.1 Configuração 1	71
11.2 Configuração 2	80

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

A necessidade de aumento da capacidade de produção das indústrias, associado à utilização de tecnologias como a eletrônica de potência e os sistemas automatizados, apresenta diversos reflexos na qualidade da energia elétrica. Afundamentos de tensão, harmônicas, sobretensões e flicker são alguns dos fenômenos presentes em sistemas elétricos industriais.

Em decorrência destes fenômenos, diversos problemas de falhas e desligamentos de processos produtivos, bem como perdas precoces de transformadores, motores, capacitores e outros equipamentos elétricos são evidenciados. Os prejuízos econômicos resultantes dos problemas de qualidade da energia elétrica nas indústrias são muito elevados e, por isso, é objeto de grande preocupação.

Diante deste cenário e na perspectiva de contribuir para sua melhor compreensão, o presente estudo foi desenvolvido baseado num caso real de uma indústria, que faz uso de motores acionados por conversores estáticos de frequência. Uma avaliação baseada em medições, simulações computacionais e outros métodos, envolvendo a instalação de filtros harmônicos passivos foi realizada e proposta uma solução para minimização dos impactos nas grandezas elétricas e na melhoria da qualidade da energia.

Neste sentido, este trabalho aborda um caso real de uma determinada indústria de mineração que registrou perdas de equipamentos consequentes da qualidade de sua energia elétrica. Considerando que essa planta possui grande parte de suas cargas acionadas por inversores de frequência, e sendo estas cargas típicas fontes de harmônicos, optou-se por desenvolver uma análise das distorções harmônicas presentes na instalação visando reduzir as distorções harmônicas e consequentemente seus reflexos no sistema elétrico.

São apresentados e analisados os resultados dos cálculos de fluxo de potência, correção de reativos e mitigação de distorções harmônicas para o sistema elétrico em questão, através das seguintes etapas:

- Simulações computacionais dos fluxos de potências ativa e reativa nas diversas barras do sistema;
- Análise do fator de potência total no ponto de conexão entre o sistema e o ponto de conexão com a concessionária;
- Análise do sistema quanto às quedas de tensão durante a operação, bem como a otimização dos taps dos transformadores de potência;
- Avaliação da condição de ressonância paralela e níveis de distorções harmônicas no sistema, com sua devida correção.

As etapas que compõem o estudo estão distribuídas nos capítulos subsequentes, compreendendo: os aspectos inerentes às distorções harmônicas, no capítulo II, o levantamento de dados do caso estudado, no capítulo III, a análise, simulações e resultados obtidos, no capítulo IV, a avaliação dos resultados e soluções para o problema, no capítulo V e as observações, recomendações e conclusões no capítulo VI.

CAPÍTULO II – DISTORÇÕES HARMÔNICAS

2.1 Conceituação

Os harmônicos são ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras a uma frequência de referência, chamada de fundamental (60Hz no sistema elétrico brasileiro). A combinação dos harmônicos com a componente fundamental acarreta em deformações na forma de onda senoidal ideal, conforme demonstrado no exemplo da figura 1:

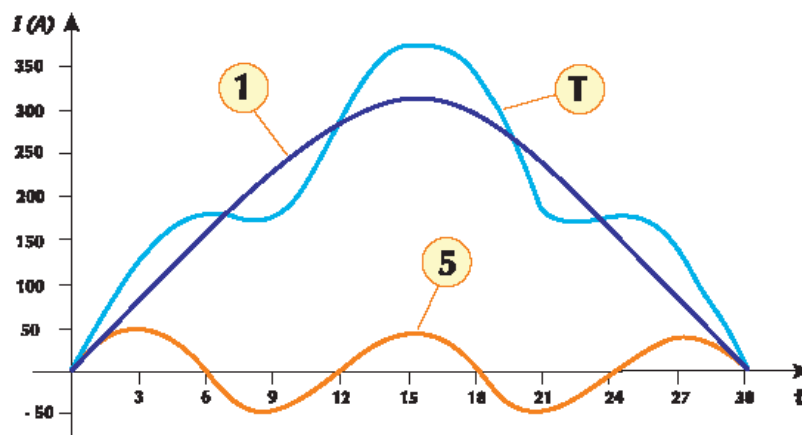


Figura 1 – Forma de onda resultante (T) da corrente fundamental (1) e sua quinta harmônica (5)

As harmônicas podem ser classificadas quanto a sua ordem ou frequência e sequência de fases, podendo ser positiva (+), negativa (-) e zero (0). A sequência refere-se à rotação física com respeito ao fundamental. Como exemplo, tem-se que em um motor de indução, um harmônico de sequência positiva gera um campo magnético que gira na mesma direção do fundamental; já um harmônico de sequência negativa gira na direção oposta.

A Tabela 1 apresenta as sequências características das primeiras 11 ordens harmônicas ímpares. Por não terem presença característica nos sistemas elétricos, as harmônicas de ordem par não são contempladas neste trabalho.

Ordem	Frequência	Sequência
1	60	+
3	180	0
5	300	-
7	420	+
9	540	0
11	660	-
...

Tabela 1 - Ordem e frequência das harmônicas ímpares

Na Tabela 2 são apresentados alguns efeitos relacionados à sequência dos harmônicos:

Sequência	Rotação	Efeitos típicos
Positiva	Adiante	Aquecimento de condutores, interruptores de circuito etc.
Negativa	Reversa	Aquecimento como acima, mais problemas em motores
Zero	Nenhuma	Aquecimento no neutro do sistema trifásico de 4 fios

Tabela 2 - Efeitos relacionados à sequência das harmônicas

Capacitores, transformadores, motores, cabos e demais componentes do sistema elétrico apresentam reações quando submetidos aos harmônicos presentes na rede de distribuição, podendo ter sua vida útil reduzida ou mesmo serem danificados. A seguir são apresentados alguns exemplos:

- Aquecimento e *stress* no dielétrico de capacitores, devido à reatância de um capacitor diminuir com o crescimento da frequência, o que o torna um caminho preferencial de correntes harmônicas;
- Aumento da vibração e do ruído audível e diminuição da potência útil de transformadores;
- Sobreaquecimento em motores devido a harmônicos de quinta ordem, os quais induzem campos magnéticos que giram no sentido contrário ao campo magnético da fundamental;
- Comprometimento da precisão de medidores de energia, devido à distorção da forma de onda das tensões e correntes;
- Mau funcionamento de relés microprocessados e de relés que dependem de valores de pico ou passagem por zero das ondas de tensão ou corrente para

operação, acarretando na interrupção do fornecimento de energia elétrica em alimentadores de distribuição;

- Interferências em sistemas de telecomunicações.

2.2 Geração de Distorções Harmônicas

Cargas como motores acionados por partida direta, aquecedores, iluminação e ar condicionado são consideradas cargas lineares, ou seja, cargas que geralmente não provocam distorção harmônica na corrente ou tensão de alimentação.

As distorções harmônicas presentes em um sistema elétrico são provocadas pela utilização de cargas não lineares que alteram a natureza senoidal da corrente elétrica alternada. Circuitos magnéticos saturados (transformadores, reatores, motores, geradores), fornos a arco, equipamentos monofásicos de grande porte em funcionamento intermitente, tais como grupos de máquina de solda (presentes em grandes linhas de montagem) ou equipamentos tiristorizados ou transistorizados, presentes em grande quantidade nos acionamentos controlados (conversores, inversores), são exemplos de cargas não lineares.

Neste trabalho são abordados os conversores de frequência como cargas não lineares cada vez mais presentes na indústria, registrando-se, por conseguinte, uma crescente deterioração das formas de onda de corrente e tensão dos sistemas de potência. Em condições normais, os conversores são responsáveis pela geração de harmônicos na rede, principalmente de quinta e de sétima ordens.

A utilização de conversores estáticos de frequência atualmente representa o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina. São alguns dos benefícios propiciados pelos conversores de frequência:

- Redução de custos – partidas diretas ocasionam picos de corrente, que causam danos não apenas ao motor, mas também a outros equipamentos ligados ao sistema elétrico. Inversores estáticos proporcionam partidas mais suaves, reduzindo custos com manutenção.
- Eficiência energética – o rendimento global de um sistema elétrico depende não apenas do motor, mas também do controle. Os inversores estáticos de frequência apresentam rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Motores elétricos também apresentam alto rendimento, chegando a 95% ou mais em máquinas maiores operando sob condições nominais. Na variação eletrônica de velocidade, a potência fornecida pelo motor varia de maneira otimizada, influenciando diretamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + conversor).
- Aumento de produtividade – sistemas de processamento industrial geralmente são sobre dimensionados na perspectiva de um aumento futuro de produtividade. Inversores estáticos possibilitam o ajuste da velocidade operacional mais adequado ao processo, de acordo com os equipamentos disponíveis e a necessidade de produção a cada momento.
- Versatilidade – inversores estáticos de frequência são adequados para aplicações com qualquer tipo de carga. Com cargas de torque variável (pequena demanda de torque em baixas rotações), o controle reduz a tensão do motor compensando a queda de rendimento que normalmente resultaria da diminuição de carga. Com cargas de torque (ou potência) constante a melhoria de rendimento do sistema provém da capacidade de variar continuamente a velocidade, sem necessidade de utilizar múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade (como polias e engrenagens), que introduzem perdas adicionais.
- Maior qualidade – o controle preciso de velocidade obtido com inversores resulta na otimização dos processos. O controle otimizado do processo proporciona um produto final de melhor qualidade.
- Controle à distância – nos sistemas eletrônicos de variação de velocidade, o equipamento de controle pode situar-se em uma área conveniente, ficando apenas o motor acionado na área de processamento - ao contrário dos sistemas hidráulicos e mecânicos de variação de velocidade.

Os conversores de frequência são constituídos por três estágios básicos:

- Ponte de diodos- Retificação do sinal alternado - de tensão e frequência constantes - proveniente da rede de alimentação;
- Filtro ou Link DC- Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- Transistores IGBT- Inversão da tensão contínua proveniente do link DC num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis.

Na Figura 2 [7.16] são apresentados simplificadaamente os estágios dos conversores de frequência:

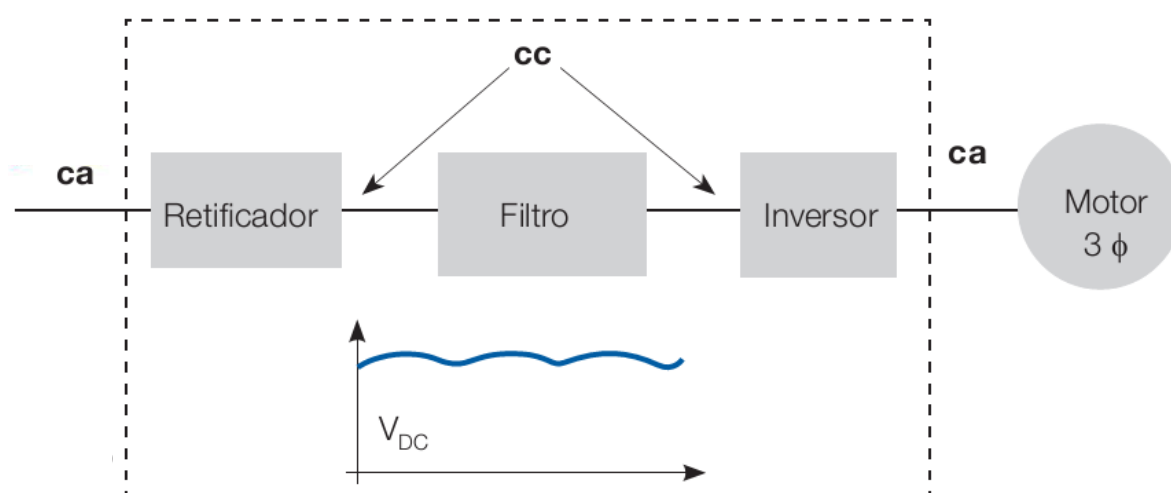


Figura 2 - Composição básica dos conversores de frequência

Para reduzir o conteúdo harmônico da corrente e aumentar o fator de potência, é comum a instalação de uma indutância na entrada e/ou no link DC do conversor. O indutor no link DC tem a vantagem de não introduzir queda de tensão, porém, dependendo da combinação do seu valor com os valores de impedância da rede e capacitância do link DC, pode resultar em ressonâncias indesejadas com o sistema. A reatância de rede, por outro lado, diminui a tensão média do circuito intermediário (comparada àquela obtida sem reatância), mas é mais eficaz na redução de eventuais transientes de sobretensão da rede, além de reduzir a corrente eficaz nos diodos do retificador e o ripple de corrente nos capacitores do circuito intermediário, aumentando a vida útil dos semicondutores e do banco de

capacitores constituintes do link DC. A Figura 3 [7.16] mostra formas de onda típicas de corrente na entrada do conversor, sem reatância de entrada (a) e com reatância de entrada (b):

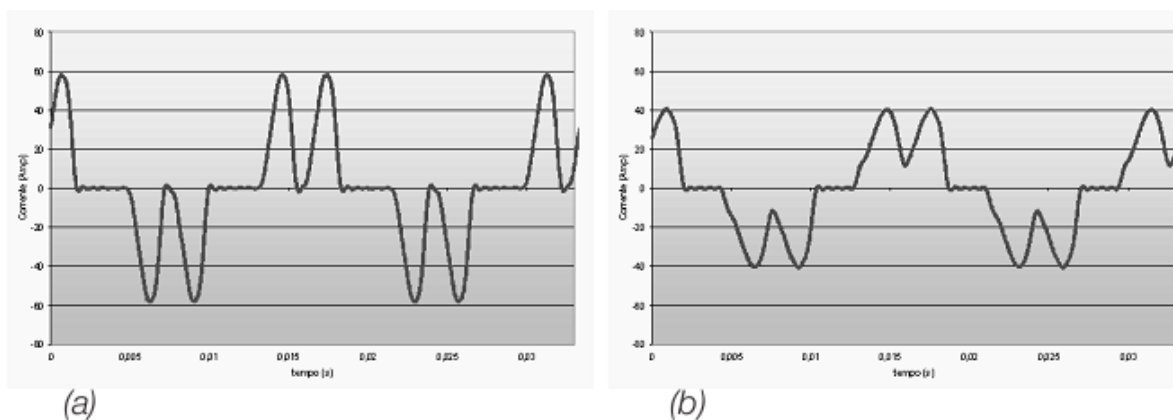


Figura 3 - Corrente na entrada do conversor, sem reatância de entrada (a) e com reatância de entrada (b)

A modelagem dos conversores de frequência pode ser resumida como a representação das harmônicas geradas por fontes de correntes em paralelo, onde cada fonte de corrente representa uma ordem harmônica do espectro da corrente drenada, contendo amplitudes e defasagens correspondentes, inclusive para a componente fundamental. A Figura 4 [7.14] apresenta um esquema simplificado da modelagem, onde **a**, **b**, ..., **x** representam a ordem harmônica:

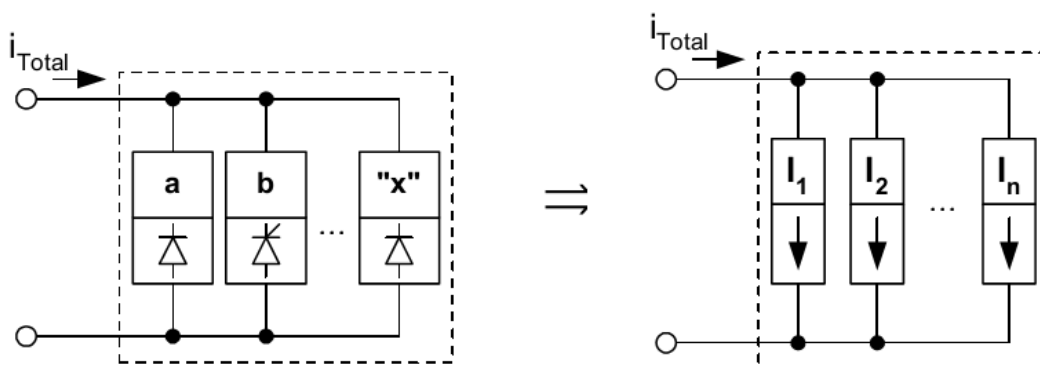


Figura 4 - Representação da modelagem de conversores de frequência

2.3 Limites para os Níveis de Distorções Harmônicas

Normas e guias nacionais e internacionais relativos à transmissão e consumo de energia elétrica estabelecem limites para os níveis de distorção harmônica, com os quais os sistemas elétricos podem operar, e impõem que os novos equipamentos não “contaminem” as redes com harmônicas de corrente de amplitude superior a determinados valores. Dessa forma, evidencia-se a importância de resolver os problemas das harmônicas, tanto para os novos equipamentos quanto para os equipamentos já instalados nas instalações industriais. No Brasil, os órgãos reguladores do setor de energia elétrica (ANEEL e ONS) e concessionárias vêm tratando esta questão com o devido rigor.

2.3.1 ANEEL – Prodist

O módulo 8 – Qualidade de Energia, contido nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST [7.6], elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, vigente desde 01/02/2012, trata da qualidade de energia no que tange ao serviço e produto em âmbito nacional. Sob o aspecto de distorção harmônica, os valores globais de referência recomendados são mostrados a seguir.

2.3.1.1 Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT%)

A distorção harmônica total de tensão DTTh% é calculada através da Equação 1:

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Equação 1 - Distorção harmônica total de tensão DTTh%

Onde:

- V_h – Tensão harmônica de ordem h
- V_1 – Tensão fundamental

A Tabela 3 apresenta os percentuais em relação à fundamental para os níveis de referência para distorções harmônicas totais de tensão DTTh%:

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Tabela 3 - Níveis de referência para DTTh%

2.3.1.2 Distorção Harmônica Individual de Tensão ($DIT_h\%$)

A distorção harmônica individual de tensão DITh% é calculada através da Equação 2:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

Equação 2 - Distorção harmônica individual de tensão DITh%

Onde:

- V_h – Tensão harmônica de ordem h
- V_1 – Tensão fundamental

A Tabela 4 apresenta os percentuais em relação à fundamental para os níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão DITh%:

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
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

Tabela 4 - Níveis de referência para DITh%

2.3.2 ONS – Procedimentos de Rede

O submódulo 2.8 – “Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes”, contido nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS [7.7], vigente desde 01/12/2010, apresenta os indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira relacionados à Qualidade de Energia Elétrica e os valores limites de referência tanto no aspecto global ou sistêmico, como individual ou por agente, aplicáveis a toda a rede básica de energia.

Sob o aspecto de distorção harmônica, os valores globais de referência recomendados são mostrados a seguir.

2.3.2.1 Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT)

A distorção de tensão harmônica total DTHT é calculada através da Equações 3 e 4:

$$DTHT = \sqrt{\sum V_h^2} \quad (\text{em } \%), \quad V_h = 100 \frac{V_h}{V_1}$$

Equações 3 e 4 - Distorção de tensão harmônica total DTHT

Onde:

- V_h – Tensão harmônica de ordem h
- V_1 – Tensão fundamental

A Tabela 5 apresenta os percentuais em relação à fundamental para os níveis de referência para distorções harmônicas de tensão:

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela 5 - Níveis de referência para distorções harmônicas de tensão

2.3.3 IEC 1000 parte 2, seção 4

A IEC 1000-2-4 (parte 2, seção 4) [7.5] retrata os níveis de compatibilidade de distúrbios conduzidos de baixa frequência em plantas industriais.

A norma divide sua aplicação em 03 (três) classes de ambientes eletromagnéticos, sendo:

- **Classe 1** – Esta classe aplica-se a alimentadores protegidos e tem níveis mais baixos do que a rede pública. Essa classe relaciona-se com o uso de equipamentos muito sensíveis a distúrbios no sistema elétrico, tais como instrumentação de laboratórios, equipamentos de automação, proteção, instrumentação, etc.
- **Classe 2** – O nível de compatibilidade dessa classe é idêntica à da rede elétrica. Equipamentos alimentados pela rede pública também podem ser inclusos nesta classe industrial.
- **Classe 3** – Esta classe aplica-se às cargas industriais, especialmente quando as seguintes condições são encontradas:
 - A maioria das cargas é alimentada por conversores;
 - Máquinas de solda são presentes;
 - Partidas de grandes motores são frequentes;
 - Cargas variam rapidamente.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os níveis de compatibilidade totais e individuais, respectivamente, para harmônicos:

Distorção Harmônica Total	Classe 1	Classe 2	Classe 3
	5%	8%	10%

Tabela 6 - Níveis de compatibilidade para distorção harmônica total

Ordem Harmônica	Classe 1 V %	Classe 2 V %	Classe 3 V %
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25	0,2 + 12,5/h	0,2 + 12,5/h	$5 \times \sqrt{11/h}$

Tabela 7 - níveis de compatibilidade para harmônicos individuais

2.3.4 IEEE-519

O guia IEEE 519-1992 [7.2] define limites máximos de distorção harmônica para sistemas elétricos de potência, os quais são apresentados a seguir:

2.3.4.1 Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_v)

A tabela 11.1 do guia IEEE 519, reproduzida na tabela 8 abaixo, define os limites recomendados para as distorções harmônicas individual e total de tensão:

**Table 11.1
Voltage Distortion Limits**

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

Tabela 8 – Limites de distorções harmônicas de tensão

O nível de distorção harmônica individual de tensão refere-se à porcentagem de uma determinada componente harmônica individual em relação à componente de frequência fundamental do sistema. Já o nível de distorção harmônica total de tensão é dado por:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%$$

Equação 5 – Nível de distorção harmônica total - THD_v

Onde:

- THD_v → Distorção Harmônica Total de Tensão, expressa em porcentagem da tensão nominal do sistema;
- V_h ou IHD_v → Componente harmônica individual de tensão de ordem h, em valor eficaz (rms), expressa em Volts;

- $V_n \rightarrow$ Tensão fundamental nominal (rms) do sistema, expressa em Volts.

Esses limites devem ser considerados para condição normal de operação, ou seja, regime permanente. Para pequenos períodos, partidas ou condições não-usuais, esses limites podem ser excedidos em 50%.

2.3.4.2 Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi)

As tabelas 10.3 e 10.4 do guia IEEE 519, reproduzidas a seguir nas tabelas 9 e 10, respectivamente, definem os limites recomendados para as distorções harmônicas de corrente:

Table 10.3
Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{se}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{se}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Tabela 9 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas até 69kV

Table 10.4
Current Distortion Limits for General Subtransmission Systems
(69 001 V Through 161 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.
 I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Tabela 10 – Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas acima de 69kV

O nível de distorção harmônica total de corrente é dado por:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_n} \times 100\%$$

Equação 6 – Nível de distorção harmônica total de corrente - THDi ou TDD

Onde:

- THDi ou TDD → Distorção Harmônica Total de Corrente, expressa em porcentagem da corrente nominal do sistema;
- I_h ou IHDi → Componente harmônica individual de corrente de ordem h, em valor eficaz (rms), expressa em Amperes;
- I_n → Corrente fundamental nominal (rms) do sistema, expressa em Amperes;
- h → Ordem harmônica.

Assim como no caso do THDv, esses limites devem ser usados para a condição de regime permanente. Para pequenos períodos, partidas ou condições não-usuais, esses limites podem ser excedidos em 50%.

Usualmente, em sistemas elétricos industriais são analisados apenas os níveis de distorção harmônica total de tensão - THDv, que são suficientes para a avaliação da qualidade da energia elétrica.

2.3.5 Ressonância

A ressonância é uma característica de todos os circuitos LC, definida pela igualdade das reatâncias capacitivas e indutivas. A ressonância pode ser série ou paralela. A ressonância série resulta em uma baixa impedância para o fluxo de harmônicos de corrente, enquanto a ressonância paralela implica em alta impedância para o fluxo de harmônicos de corrente. A ressonância paralela, mais comum de ocorrer nos sistemas elétricos de modo geral, pode representar um sério problema quando esta impedância for percorrida por uma corrente, mesmo que pequena, de mesma frequência, fazendo com que se elevem drasticamente as tensões e as distorções harmônicas no sistema.

Nos sistemas de potência, a utilização de capacitores para correção do fator de potência pode provocar, no ponto de conexão, uma ressonância paralela em uma das frequências harmônicas presentes no sistema. Desta forma, em sistemas onde existem cargas não lineares, como por exemplo, inversores de frequência e bancos de capacitores, tornam-se imprescindíveis avaliações da frequência de ressonância para a identificação dos riscos da ressonância paralela.

A Figura 5 [7.13] mostra um circuito paralelo e as condições de ocorrência da ressonância em relação aos harmônicos injetados no sistema por cargas não lineares:

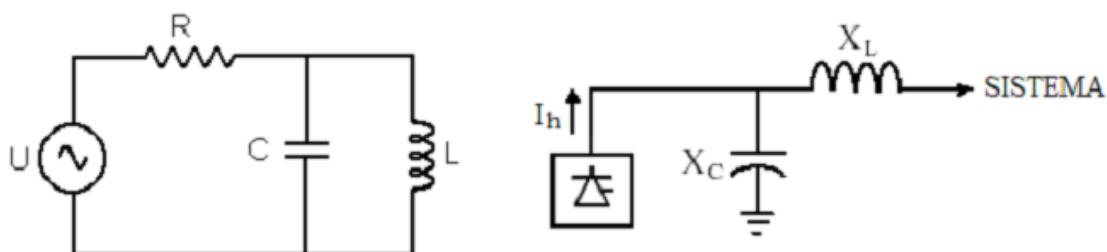


Figura 5 - Circuito paralelo ressonante

Na ressonância as seguintes relações são estabelecidas [7.13]:

$$\omega_L = \frac{1}{\omega_C} \text{ e } \omega^2 = \frac{1}{LC}$$

Equações 7 e 8 - Relação entre indutância e capacitância

Onde:

- ω - Frequência (rad/seg);
- L- Indutância em paralelo (H);
- C- Capacitância em paralelo (F).

Logo, a frequência de ressonância é determinada pelas expressões [7.13]:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ ou } f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Equações 9 e 10 - Frequência de ressonância

Onde:

- ω_R - Frequência de ressonância (rad/seg);
- f_R - Frequência de ressonância (Hz);
- L- Indutância em paralelo (H);
- C- Capacitância em paralelo (F).

Para os casos de sistemas industriais com bancos de capacitores, a frequência de ressonância pode ser obtida utilizando-se a seguinte equação simplificada [7.2]:

$$f_r = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR}}$$

Equação 11 – Frequência de ressonância

Onde:

- f_r → Ordem harmônica da ressonância;
- MVA_{acc} → Potência de curto-circuito do sistema, em MVA;
- MVA_r → Potência total dos bancos de capacitores, em MVAr.

2.4 Filtros Harmônicos

Uma vez concluída as análises dos limites de distorção por harmônicas bem como calculada a frequência de ressonância, deverão ser aplicados, quando necessário, filtros harmônicos para reduzir os níveis de THD e alterar a frequência de ressonância da instalação.

O método mais simples para se obter controle sobre o nível de distorções harmônico e também prover correção do fator de potência é acrescentar a implementação de filtros harmônicos passivos, que atuam na atenuação de determinadas ordens harmônicas características de cargas não lineares.

Basicamente, os tipos de filtros harmônicos, ilustrados na figura 6, são empregados em sistemas industriais [7.3]:

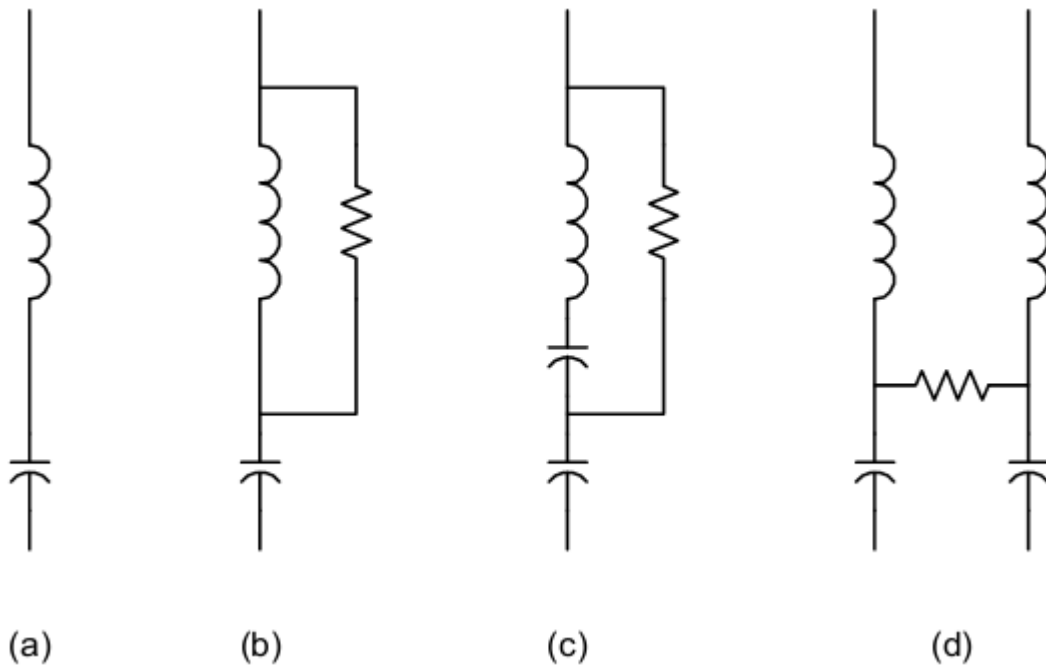


Figura 6 - Filtros harmônicos: sintonizado ou passa-faixa (a), passa-altas (b), tipo C (c) e tipo Pi (d)

- Filtro sintonizado ou passa-faixa:** é o tipo de filtro mais simples e o mais amplamente aplicado. Sua principal vantagem é a impedância quase nula na frequência de ressonância, produzindo uma filtragem quase perfeita nessa frequência; uma desvantagem é o elevado valor de ressonância paralela com a rede em frequências abaixo da sintonizada, podendo aumentar consideravelmente outros possíveis harmônicos. Possui filtragem de harmônicos pouco eficiente em frequências muito acima da sintonizada, apesar disso sua simplicidade construtiva destes filtros determina baixos custos de implantação e/ou manutenção.
- Filtro passa-altas:** O filtro passa-altas apresenta um balanço eficaz entre a filtragem de uma frequência alvo e todos as outras acima desta. É tipicamente sintonizado a partir da 7ª harmônica. O resistor também pode ser definido para amortecer ressonâncias paralelas de ordem inferior à frequência de sintonia. Em razão de poder consumir uma considerável potência na frequência fundamental, não é normalmente aplicado na 5ª harmônica ou inferiores.

- **Filtro tipo C:** tem características de desempenho muito similares ao filtro passa-altas, com a vantagem que o resistor não consome potência na frequência fundamental em seus parâmetros nominais. Por esta razão, é aplicado principalmente onde é necessário o amortecimento significativo da 5ª harmônica ou inferiores, como fornos a arco elétrico e ciclo-conversores.
- **Filtro tipo Pi:** corresponde basicamente a dois filtros passa-faixas ligados por um resistor. A principal vantagem deste filtro harmônico é o bom desempenho de filtragem em ambas as frequências ressonantes, com bom amortecimento de ressonâncias paralelas. Normalmente, o resistor pode ter uma potência nominal inferior a um filtro passa-alta ou tipo C.

Os filtros sintonizados e os passa-altas são os mais comumente utilizados em sistemas industriais. A Figura 7, extraída do manual do software SKM Power Tools [7.17], apresenta uma comparação entre as respostas em frequência destes tipos de filtro harmônico:

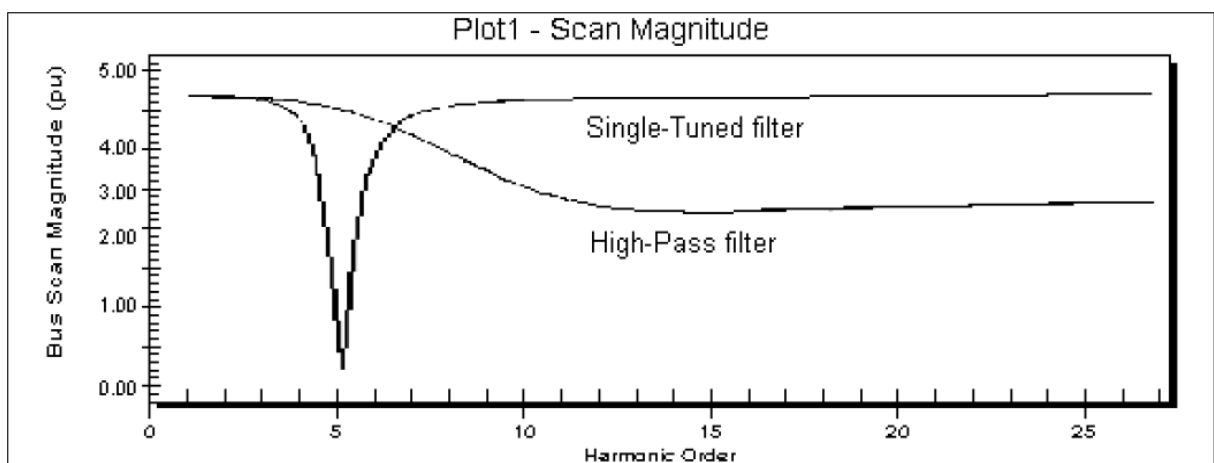


Figura 7 - Comparação entre as respostas em frequência dos filtros sintonizado e passa-altas

onde:

- Single-Tuned filter → Filtro sintonizado;
- High-Pass filter → Filtro passa-altas.

Os filtros harmônicos sintonizados, objeto deste estudo, são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva. Para frequências menores que a frequência de sintonia são capacitivos e para frequências superiores à frequência de sintonia, são indutivos.

Admitindo a parte resistiva desprezível, a frequência angular de ressonância do circuito série pode ser determinada por [7.3]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi \cdot f_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Equação 12 – Frequência de sintonia do filtro

Onde:

- ω_0 - Frequência de sintonia (rad/seg);
- f_0 - Frequência de sintonia (Hz);
- L- Indutância em paralelo (H);
- C- Capacitância em paralelo (F);
- T_0 -Período de sintonia.

O comportamento da impedância e respectivo ângulo de um filtro sintonizado, com as frequências relativas às harmônicas de 5^o e 7^o ordem, são ilustrados nas figuras 8 e 9 [7.12], respectivamente:

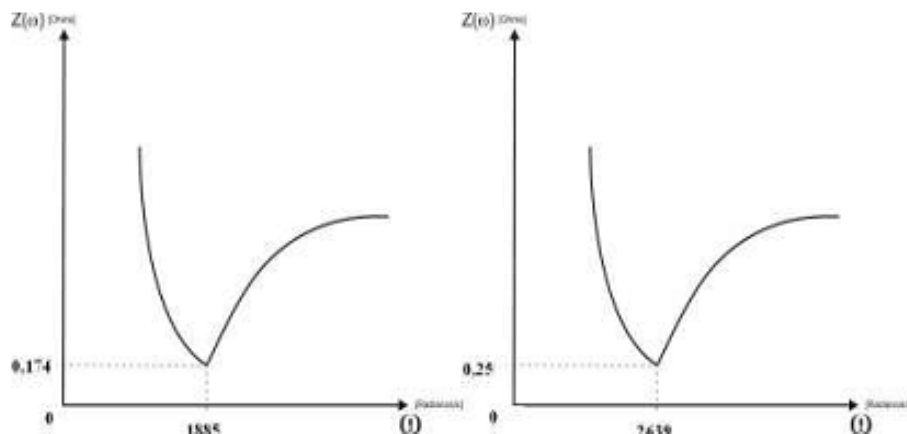


Figura 8 - Módulo da impedância de um circuito RLC série versus frequência

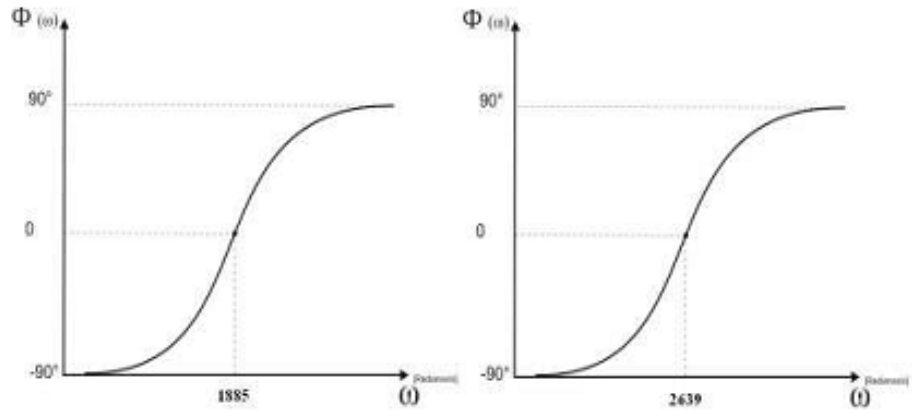


Figura 9 - Ângulo da impedância de um circuito RLC série versus frequência

O fator de qualidade (Q) determina a seletividade do filtro, ou seja, a largura de banda passante em torno de sua frequência de sintonia, como exemplificado na Figura 10 [7.12]:

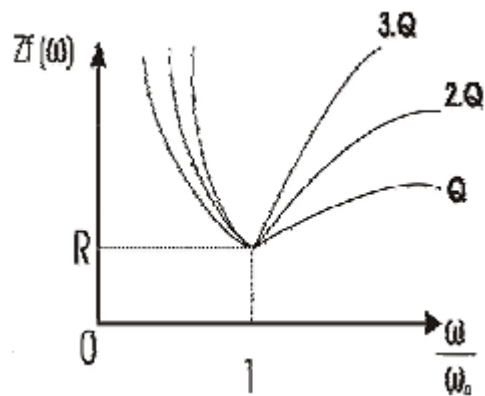


Figura 10 - Exemplo de fatores de qualidade distintos para um mesmo filtro

CAPÍTULO III – DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DO SISTEMA ANALISADO

O foco da análise se dá no fator de potência total da instalação, nas variações de tensão resultantes das condições de operação da planta, bem como na qualidade da energia do sistema com relação à presença de distorções harmônicas, com vistas à identificação dos problemas que levaram à perda de equipamentos na indústria.

3.1 Fator de Potência

Considerou-se que o sistema deve apresentar, no ponto de conexão com a concessionária de energia, um fator de potência acima de 0,92 indutivo entre 6:00hs e 0:00hs, e acima de 0,92 capacitivo entre 00:00hs e 06:00hs, de acordo com o Artigo nº 64 da Resolução ANEEL nº. 456 de 29 de novembro de 2000.

3.2 Variações de Tensão

As tensões nas barras foram analisadas admitindo-se máxima queda de tensão de 5% e máxima sobretensão de 10%.

3.3 Limites de Distorções Harmônicas

Foram considerados como limites máximos de distorção harmônica para sistemas elétricos de potência os critérios da IEEE-519, apresentados no item 2.3.4.

3.4 Características do Sistema Elétrico Analisado

A Figura 11 apresenta o diagrama unifilar simplificado do sistema estudado:

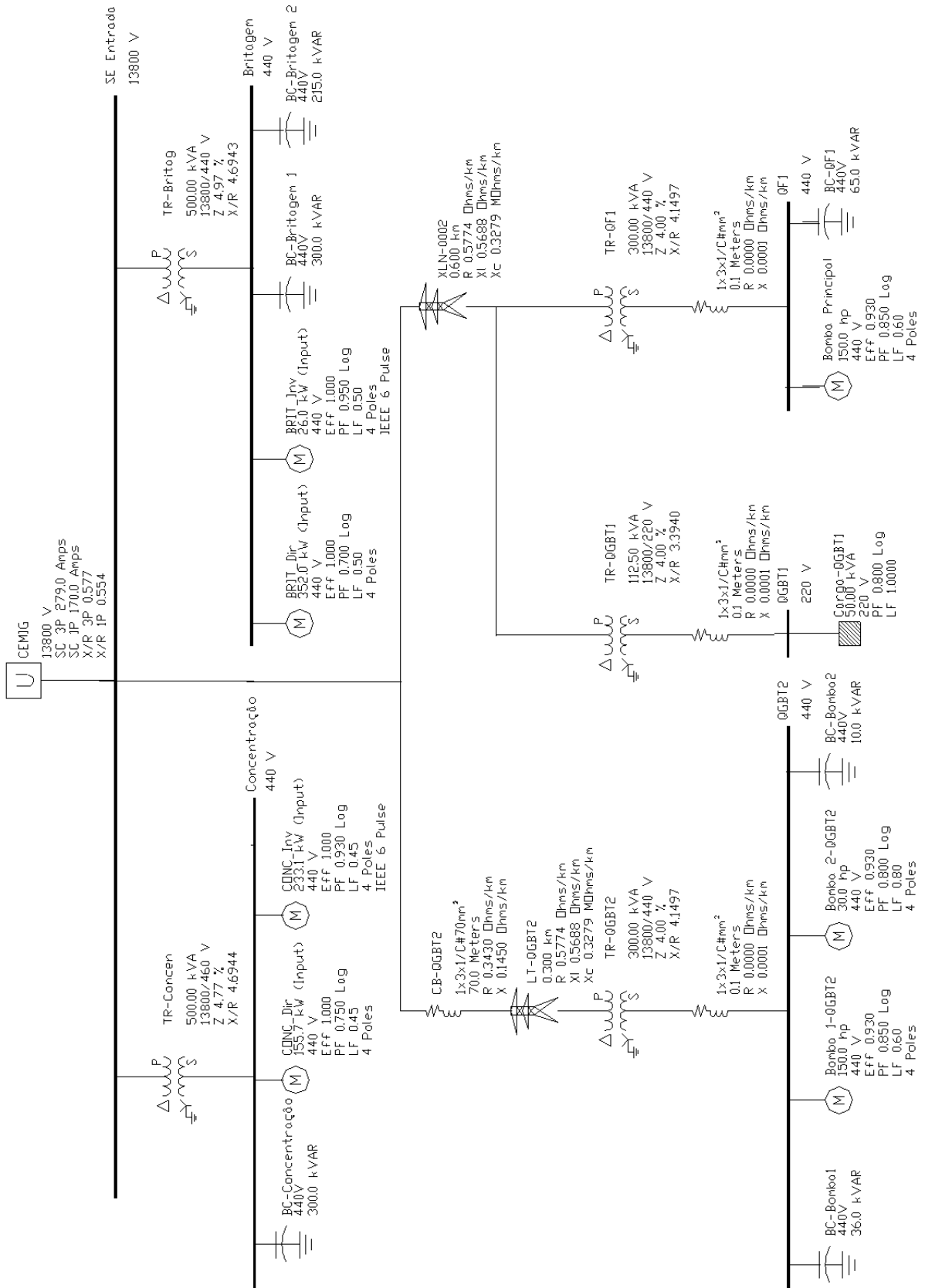


Figura 11 – Diagrama unifilar simplificado do sistema em questão

3.5 Fontes de Energia

O sistema elétrico estudado é suprido de energia elétrica por meio de uma linha de transmissão em 13,8kV da concessionária. A distribuição de energia e a alimentação das cargas do sistema são feitas em 440V e 220V.

Foram considerados nos processamentos os seguintes valores de contribuição de curto-circuito da concessionária de energia:

- Corrente de curto-circuito trifásica em 13,8kV: 279A, $X/R = 0,577$
- Corrente de curto-circuito fase-terra em 13,8kV: 179A, $X/R = 0,544$

A condição operacional do sistema elétrico corresponde à alimentação dos transformadores de 13,8-0,44kV e 13,8-0,22kV simultaneamente.

3.6 Aterramento do Sistema

Todos os transformadores da planta apresentam seus neutros solidamente aterrados, o que resulta em valores de curto-circuito fase-terra aproximadamente iguais aos valores de curto-circuito trifásico.

3.7 Transformadores de Força

Os transformadores de força foram modelados com base nas potências e impedâncias coletadas durante levantamento em campo.

Os taps de $\pm 2 \times 2,5\%$ no primário dos transformadores de 500kVA – 13,8-0,44kV foram inicialmente ajustados no modelamento conforme condição atual:

- Transformador de alimentação do CCM Britagem: tap central (0);
- Transformador de alimentação do CCM Concentração: tap -5%;

3.8 Fator de Demanda e Diversidade das Cargas

Para analisar o fluxo de potência da instalação, é imprescindível conhecer os fatores de demanda e diversidade das cargas, os quais são definidos conforme abaixo:

- Fator de demanda: é a relação entre a demanda máxima do sistema e a carga total (soma das potências nominais contínuas das cargas) conectada a ele, durante um determinado intervalo de tempo.
- Fator de diversidade: Esse fator depende do processo produtivo e representa a continuidade operacional das cargas e a simultaneidade que há entre as mesmas.

Para o modelamento das cargas dos CCMs Concentração (CCM-2) e Britagem (CCM-1), foram considerados fatores de demanda x diversidade compatíveis com os resultados das medições realizadas nos cubículos de entrada dos mesmos, apresentadas no item 3.9.

Para as demais cargas do sistema foi adotado um fator de demanda x diversidade típico de 0,6.

3.8.1 Motores e Cargas de Baixa Tensão

Os motores e cargas de baixa tensão foram modelados com base no levantamento em campo realizado, complementando-se nos casos de inexistência destas informações com valores típicos disponíveis.

Foram modeladas como cargas não lineares as cargas acionadas por conversores de frequência, acionadas pelos CCMs Concentração e Britagem. O modelamento das fontes de harmônicos das cargas foi baseado no espectro de correntes harmônicas típico de inversores de frequência / retificadores de 6 pulsos do fabricante WEG, retirados do software "WEG - Harmonic Calculator V1.00" disponibilizado pelo próprio fabricante, conforme descrito na Tabela 11:

Ordem harmônica	Magnitude
5	32,0%
7	9,5%
11	6,5%
13	3,5%
17	2,5%
19	2,0%
23	1,5%
25	1,0%

Tabela 11 – Espectro harmônico de inversores de frequência/retificadores de 6 pulsos

A fim de facilitar a modelagem e a identificação das cargas, optou-se por classificá-los em dois grupos, conforme listado abaixo:

- Grupo 1 ("NOME DO PAINEL_Dir")
Grupo de motores acionados por partida direta.
- Grupo 2 ("NOME DO PAINEL_Inv")
Grupo de motores acionados por conversores de frequência.

Neste estudo foram consideradas em operação todas as cargas presentes no sistema, com exceção da bomba 2 de 30kW (reserva), alimentada pelo QGBT 2, e seu respectivo banco de capacitores.

Para a modelagem das cargas foram considerados fatores de potência e rendimentos estimados com base nos resultados das medições apresentadas no item 3.9.

3.8.2 Compensação de Reativos do Sistema

Para os processamentos de fluxo de potência e análise de distorções harmônicas, foram considerados inicialmente os seguintes bancos de capacitores existentes:

Painel	Tensão nominal	Potência do banco de capacitores
CCM Britagem	440V	300kVAR (4 estágios de 25kVAR + 4 estágios de 50kVAR) + 215kVAR (4 bancos de 50kVAR + 1 banco de 15kVAR)
CCM Concentração	440V	300kVAR (12 estágios de 25kVAR)
QF1	440V	65kVAR (bomba 150CV)
QGBT 2	440V	36kVAR (bomba 150CV) + 10kVAR (bomba 30CV)

Tabela 12 – Bancos de capacitores do sistema elétrico da MSM

3.8.3 Cabos de Média e Baixa Tensão

Os cabos de média e baixa tensão foram modelados com base nas informações obtidas nos documentos apresentados pela equipe técnica da planta e no levantamento em campo realizado.

Para as impedâncias características foram considerados os dados de cabos informados em catálogos de fabricantes tradicionais.

3.9 Medições Realizadas

3.9.1 Instrumento Utilizado

O instrumento utilizado para a realização das medições foi o Analisador de Energia RE6000 da EMBRASUL.



Figura 12 – Analisador de Energia RE6000 da EMBRASUL

Este é um medidor registrador de grandezas em tempo real para sistemas elétricos monofásicos, bifásicos e trifásicos em baixa, média e alta tensão. Possui três canais de entrada para sinais de tensão, três canais de entrada para sinais de corrente e ainda três canais de entrada para grandezas auxiliares definidas pelo usuário, conforme a Figura 13 [7.18]:

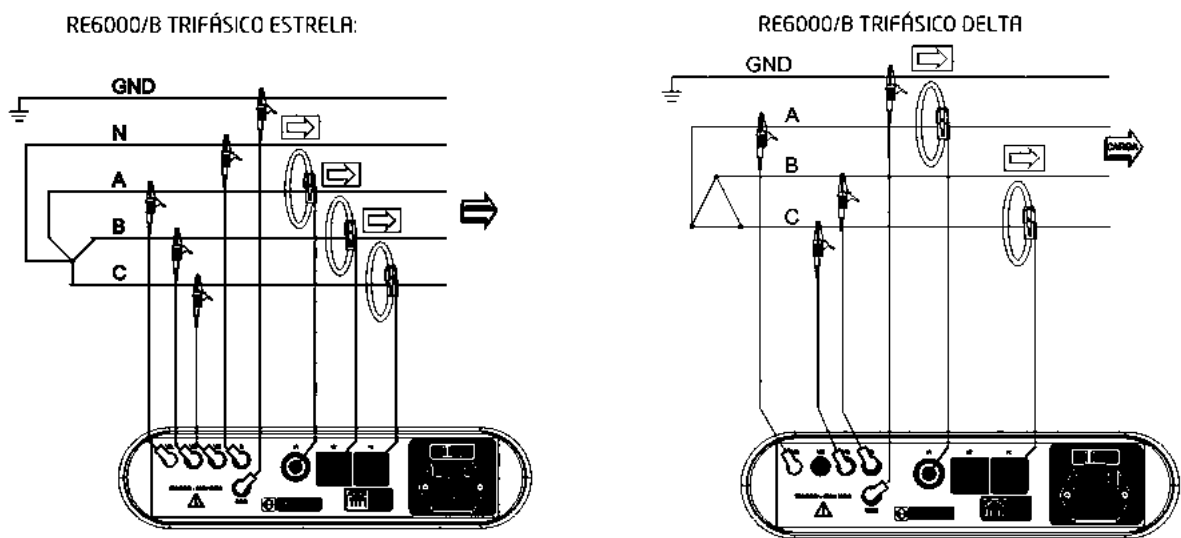


Figura 13 - Esquemas de ligação do RE6000 à rede

A partir dos sinais de entrada de tensão e corrente o instrumento calcula e indica no mostrador alfanumérico os valores de tensões de fase, tensões de linha, correntes, fatores de potência por fase e total, potência ativa, reativa e aparente por fase e total, energia ativa total (consumida ou fornecida), energia reativa capacitiva/indutiva total, DHT de tensão e correntes por fases, DHT de tensão e

corrente, potência reativa total necessária para alteração do fator de potência, sequência de fases, demandas na ponta e fora de ponta por fase e totais, fator de deslocamento etc.

3.9.2 Pontos de Realização das Medições

No intuito de avaliar a qualidade da energia e quantificar os níveis de distorção harmônica no sistema, foram efetuadas medições de grandezas elétricas no secundário dos transformadores TR-1 e TR-2 de 500kVA, responsáveis pela alimentação dos CCMs Britagem e Concentração da planta da MSM. As medições foram realizadas nos dias 31 de Maio, 01 de Junho e 07 de Junho de 2010, na Sala Elétrica Principal da planta industrial. Foram registradas as contribuições individuais harmônicas de tensão até a 25ª ordem harmônica.

O diagrama simplificado abaixo demonstra os locais em que foram efetuadas as medições das grandezas elétricas:

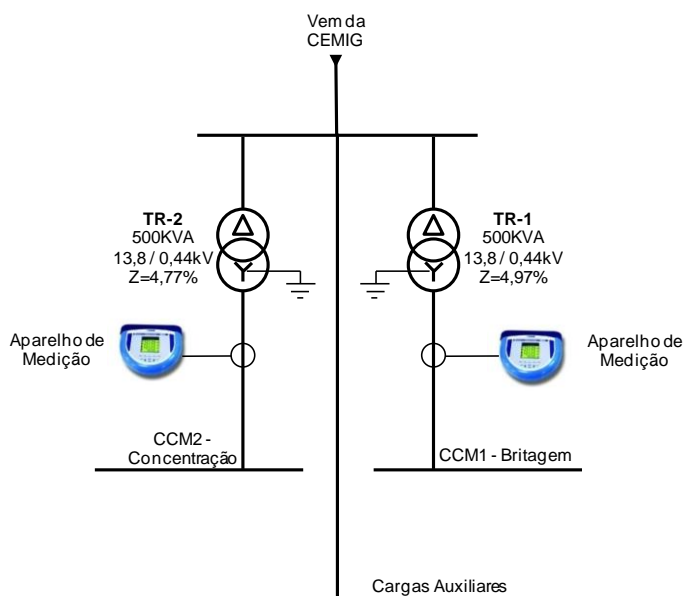


Figura 14 – Localização dos aparelhos durante a realização das medições

As medições realizadas também foram utilizadas para validar os resultados da simulação implementada.

As referências de tensão e corrente utilizadas nas medições foram obtidas conforme descrito a seguir:

- Medições na entrada do CCM Concentração: Tensões obtidas na chave de aferição localizada na porta frontal do cubículo de entrada, e correntes obtidas diretamente nos cabos de força deste mesmo cubículo de entrada;
- Medições na entrada do CCM Britagem: Tensões obtidas nos próprios barramentos de força do cubículo de entrada, e correntes obtidas diretamente nos cabos de força deste mesmo cubículo de entrada;

3.9.3 Resultados das Medições

Seguem abaixo os registros obtidos nas medições de potências ativa, reativa e aparente, bem como distorções harmônicas de tensão totais (THDv) nas entradas dos CCMs Concentração e Britagem:

3.9.3.1 Resultados CCM Britagem

a) Resumo da Medição

EMBRASUL RE6000/B/H/T N.S:96000327 V.S.2,16 ANL 1,88 (500 milissegundos)

ANÁLISE GERAL (Integração = 500 milissegundos)

Intervalo considerado:

segunda-feira 07/06/2010 08:42:51,00 até segunda-feira 07/06/2010 17:06:38,00

Faixas de horário estabelecidas no software

Intervalo - Fora de ponta: 00:00 - 18:00 21:00 - 24:00
Intervalo - Ponta: 18:00 - 21:00
Intervalo - Reservado:

Máximos, médios e mínimos de tensões e correntes por fase.

Não considerados registros em queda e volta de energia. Tensão zero: 12,69 V

Fase A: tensões [V]

Média	260,203			Média	271,57		
Mínimo	239,930	10:30:44,00	07/06/2010	Mínimo	26,69	09:32:20,00	07/06/2010
Máximo	285,680	16:55:38,99	07/06/2010	Máximo	596,10	10:30:44,00	07/06/2010

Correntes [A]

Fase B: tensões [V]

Média	262,486			Média	269,23		
Mínimo	242,440	10:30:44,00	07/06/2010	Mínimo	18,60	09:31:29,50	07/06/2010
Máximo	283,460	17:01:35,49	07/06/2010	Máximo	619,50	10:30:44,00	07/06/2010

Correntes [A]

Fase C: tensões [V]

Média	263,021			Média	261,77		
Mínimo	243,070	10:30:44,00	07/06/2010	Mínimo	1,19	09:35:48,50	07/06/2010
Máximo	283,180	16:55:37,49	07/06/2010	Máximo	612,00	10:30:44,00	07/06/2010

Correntes [A]

FASE	Fora de ponta				FP	Ponta				
	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh		kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	541,404	0,000	25,562	542,007	0,999	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
B	530,579	0,000	168,410	556,665	0,953	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
C	505,169	0,000	94,508	513,933	0,983	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
Total	1,577 k	0,000	288,480	1,603 k	0,984	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

FASE	Reservado		Total		FP	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh						
A	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	541,404	0,000	25,562	542,007	0,999
B	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	530,579	0,000	168,410	556,665	0,953
C	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	505,169	0,000	94,508	513,933	0,983
Total	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,577 k	0,000	288,480	1,603 k	0,984

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	64,716	4,102	64,846	0,998
B	63,419	20,656	66,698	0,951
C	60,193	11,866	61,352	0,981
Total	188,328	36,624	191,856	0,982

Potências aparentes por fase, segundo máximos e mínimos trifásicos

FASE	kVA(max)	Horário	kVA(min)	Horário
A	143,022	07/06/2010 10:30:44,00	18,635	07/06/2010 09:26:12,00
B	150,191	07/06/2010 10:30:44,00	8,615	07/06/2010 09:26:12,00
C	148,759	07/06/2010 10:30:44,00	20,077	07/06/2010 09:26:12,00
3f	441,925	07/06/2010 10:30:44,00	13,006	07/06/2010 09:26:12,00

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]

07/06/2010 10:30:44,00	338,758
07/06/2010 10:30:45,50	295,264
07/06/2010 16:42:04,99	275,535

Fora de ponta [kVAr]

07/06/2010 10:30:44,00	283,796
07/06/2010 10:30:45,50	232,023
07/06/2010 09:07:45,50	210,736

Ponta [kW] Reservado [kW]

Ponta [kVAr] Reservado [kVAr]

Registro com maior DHT

DHT calculada: 9,27 %

Fase A

HARM	RMS(V)	%FUND	FASE
5	25,627	9,01	173,27
7	6,160	2,16	337,28

Fase B

HARM	RMS(V)	%FUND	FASE
5	11,623	4,12	292,54
7	9,657	3,42	193,97

Fase C

HARM	RMS(V)	%FUND	FASE
5	22,940	8,13	21,13
7	5,633	1,99	51,98

b) Gráfico das Medições de Tensão e Corrente nas Três Fases

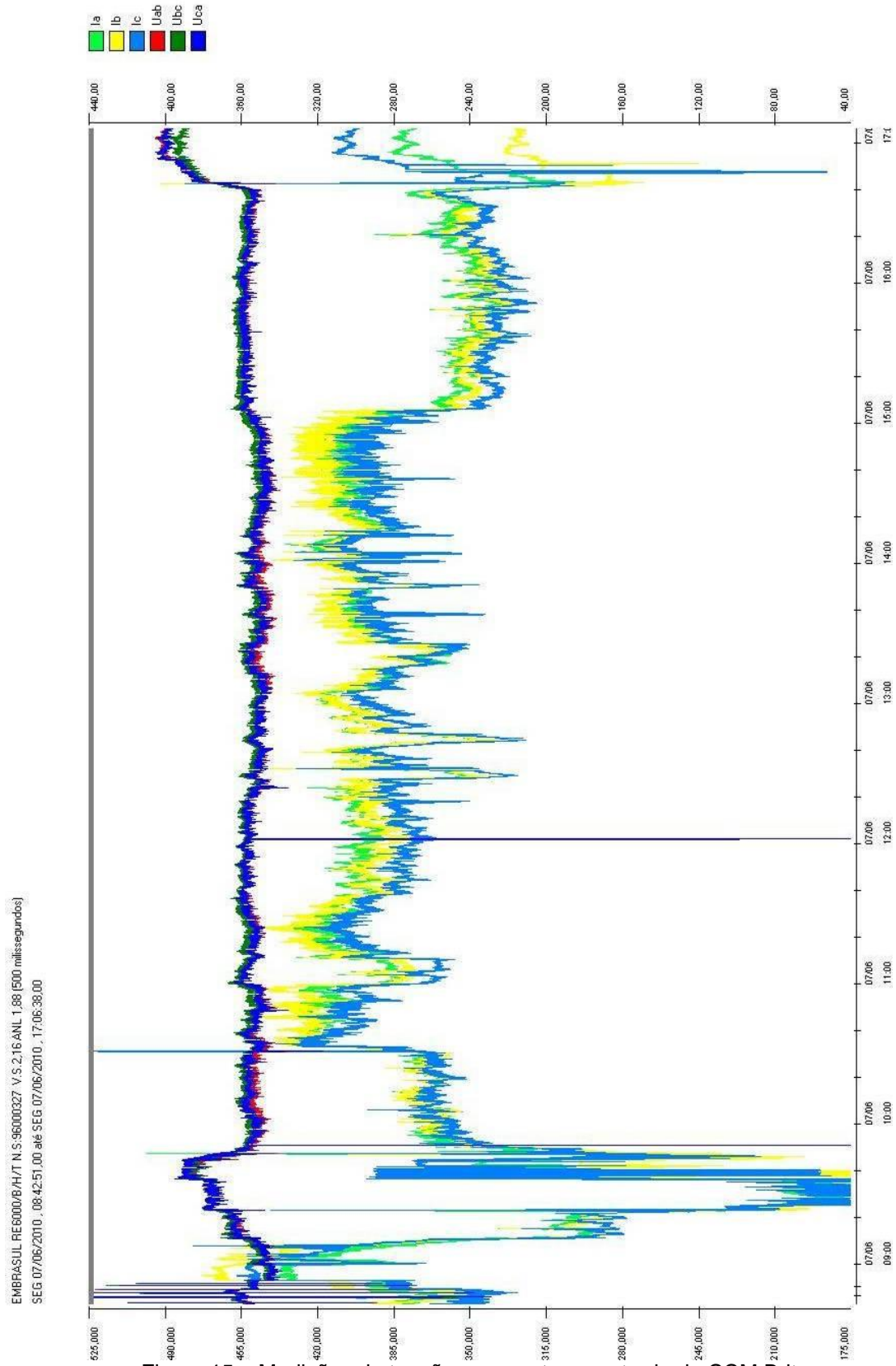


Figura 15 – Medições de tensão e corrente na entrada do CCM Britagem

c) Gráfico das Medições de Potências Ativa, Reativa e fatores de potência nas Três Fases

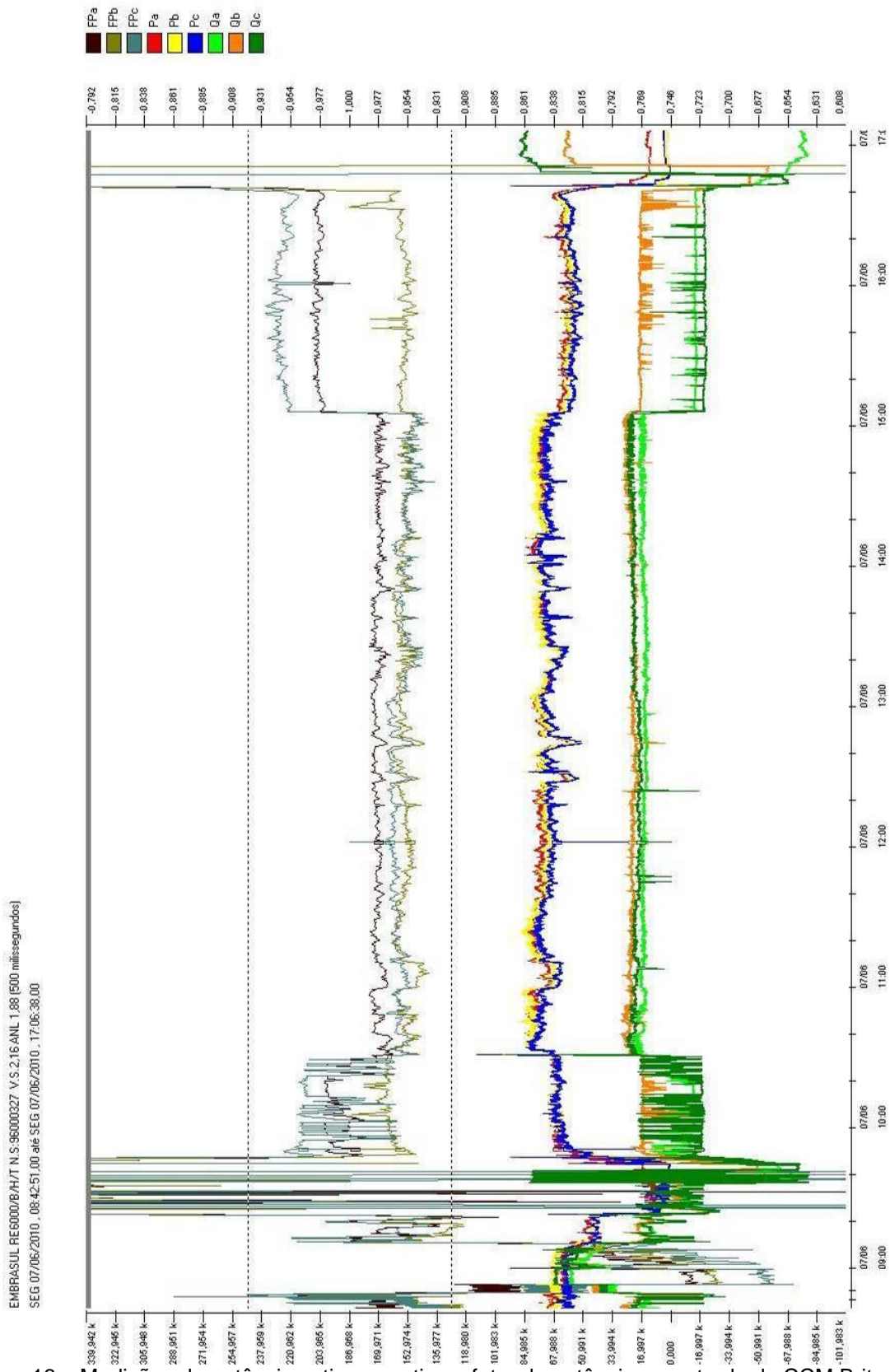


Figura 16 – Medições de potências ativa e reativa e fator de potência na entrada do CCM Britagem

d) Gráfico das Medições de THDv nas Três fases

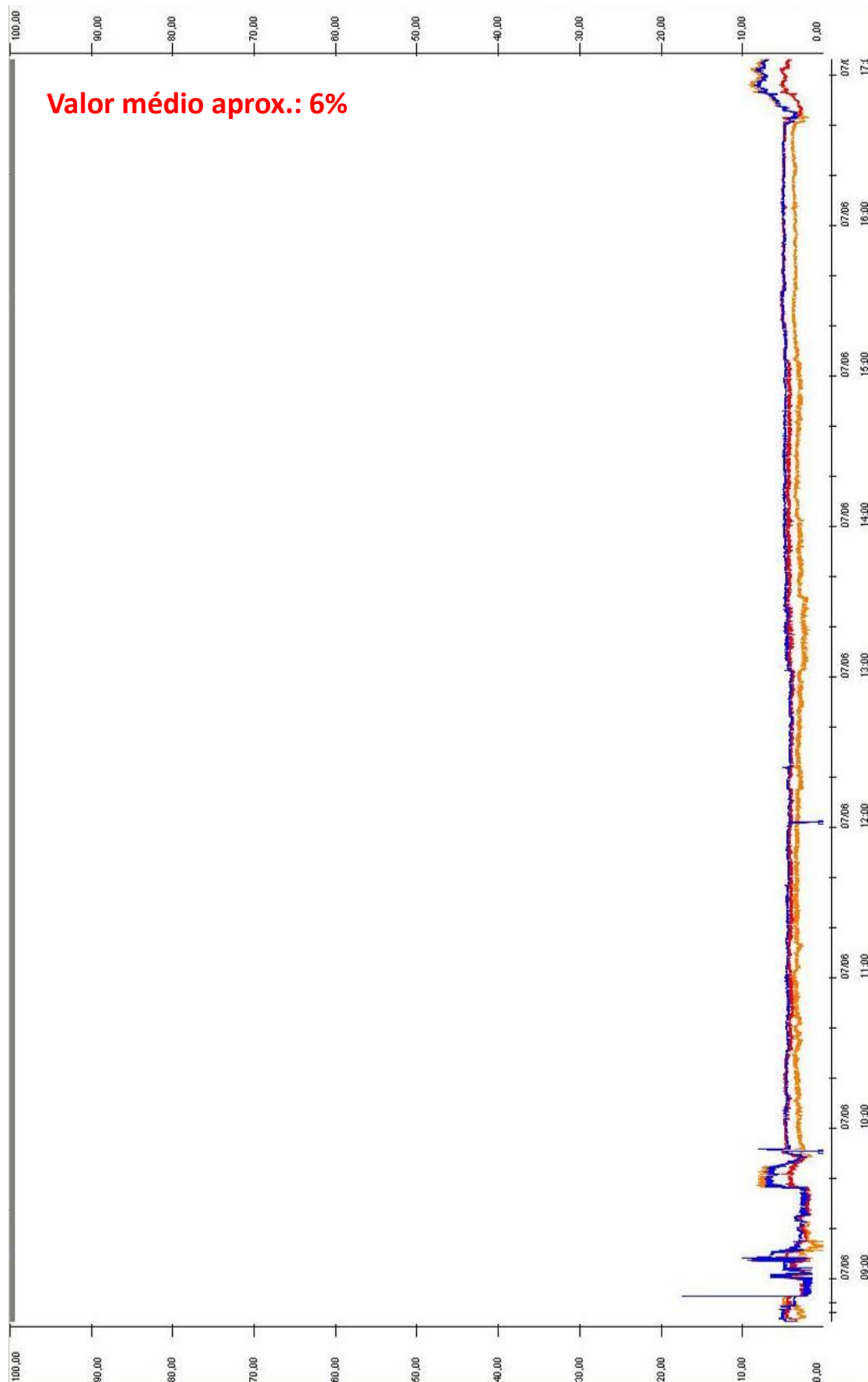


Figura 17 – THDv medido na entrada do CCM Britagem

3.9.3.2 Resultados CCM Concentração

a) Resumo da Medição

EMBRASUL RE6000/B/H/T N.S:96000327 V.S.2,16 ANL 1,88 (100 milissegundos)

ANÁLISE GERAL (Integração = 100 milissegundos)

Intervalo considerado:

segunda-feira 31/05/2010 11:24:23,00 até segunda-feira 31/05/2010 14:54:04,21

Faixas de horário estabelecidas no software

Intervalo - Fora de ponta: 00:00 - 18:00 21:00 - 24:00
Intervalo - Ponta: 18:00 - 21:00
Intervalo - Reservado:

Máximos, médios e mínimos de tensões e correntes por fase.

Não considerados registros em queda e volta de energia. Tensão zero: 12,69 V

Fase A: tensões [V]

Média 433,570
Mínimo 409,468 13:18:35,11 31/05/2010
Máximo 441,607 11:45:44,80 31/05/2010

Correntes [A]

Média 309,92
Mínimo 0,29 13:54:41,91 31/05/2010
Máximo 3,76 k 12:23:31,60 31/05/2010

Fase B: tensões [V]

Média 440,636
Mínimo 417,196 13:18:35,11 31/05/2010
Máximo 447,843 12:34:55,10 31/05/2010

Correntes [A]

Média 315,01
Mínimo 290,10 11:26:41,50 31/05/2010
Máximo 1,22 k 12:23:31,60 31/05/2010

Fase C: tensões [V]

Média 447,733
Mínimo 423,318 13:18:35,11 31/05/2010
Máximo 456,643 11:45:44,80 31/05/2010

Correntes [A]

Média 344,90
Mínimo 323,69 14:44:54,01 31/05/2010
Máximo 1,54 k 14:16:23,21 31/05/2010

FASE	Fora de ponta				FP	Ponta				
	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh		kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	316,223	0,000	-347,038	469,502	-0,673	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
B	354,968	0,000	-330,472	484,989	-0,732	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
C	391,077	0,000	-371,787	539,599	-0,725	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
Total	1,062 k	0,000	-1,049 k	1,493 k	-0,711	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
FASE	Reservado				FP	Total				
	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh		kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	316,223	0,000	-347,038	469,502	-0,673
B	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	354,968	0,000	-330,472	484,989	-0,732
C	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	391,077	0,000	-371,787	539,599	-0,725
Total	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,062 k	0,000	-1,049 k	1,493 k	-0,711

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	90,484	-99,302	134,344	-0,673
B	101,571	-94,562	138,775	-0,732
C	111,903	-106,383	154,401	-0,725
Total	303,958	-300,247	427,246	-0,711

Potências aparentes por fase, segundo máximos e mínimos trifásicos

FASE	kVA(max)	Horário	kVA(min)	Horário
A	1,642 k	31/05/2010 12:23:31,60	123,492	31/05/2010 11:26:41,50
B	544,746	31/05/2010 12:23:31,60	127,600	31/05/2010 11:26:41,50
C	627,159	31/05/2010 12:23:31,60	145,298	31/05/2010 11:26:41,50
3f	2,810 k	31/05/2010 12:23:31,60	396,206	31/05/2010 11:26:41,50

Demandas máximas por horário

Fora de ponta [kW]		Ponta [kW]	Reservado [kW]
31/05/2010 14:16:23,21	2,667 k		
31/05/2010 13:33:56,11	2,150 k		
31/05/2010 12:23:31,60	1,622 k		
Fora de ponta [kVAr]		Ponta [kVAr]	Reservado [kVAr]
31/05/2010 12:23:31,60	-2,294 k		
31/05/2010 13:33:56,11	1,793 k		
31/05/2010 14:16:23,21	-830,893		

Registro com maior DHT

DHT calculada: 11,52 %

Fase A

HARM	RMS(V)	%FUND	FASE
5	36,909	8,56	251,89
7	9,783	2,27	163,65
9	5,559	1,29	291,75
11	4,224	0,98	70,13

Fase B

HARM	RMS(V)	%FUND	FASE
5	38,363	8,78	141,24
7	8,648	1,98	325,50
9	3,104	0,71	99,93
11	4,878	1,11	319,17

Fase C

HARM	RMS(V)	%FUND	FASE
3	5,344	1,19	89,03
5	37,856	8,50	32,08
7	6,458	1,44	70,79
9	2,895	0,65	164,75
11	4,231	0,94	217,88

b) Gráfico das Medições de Tensão e Corrente nas Três fases

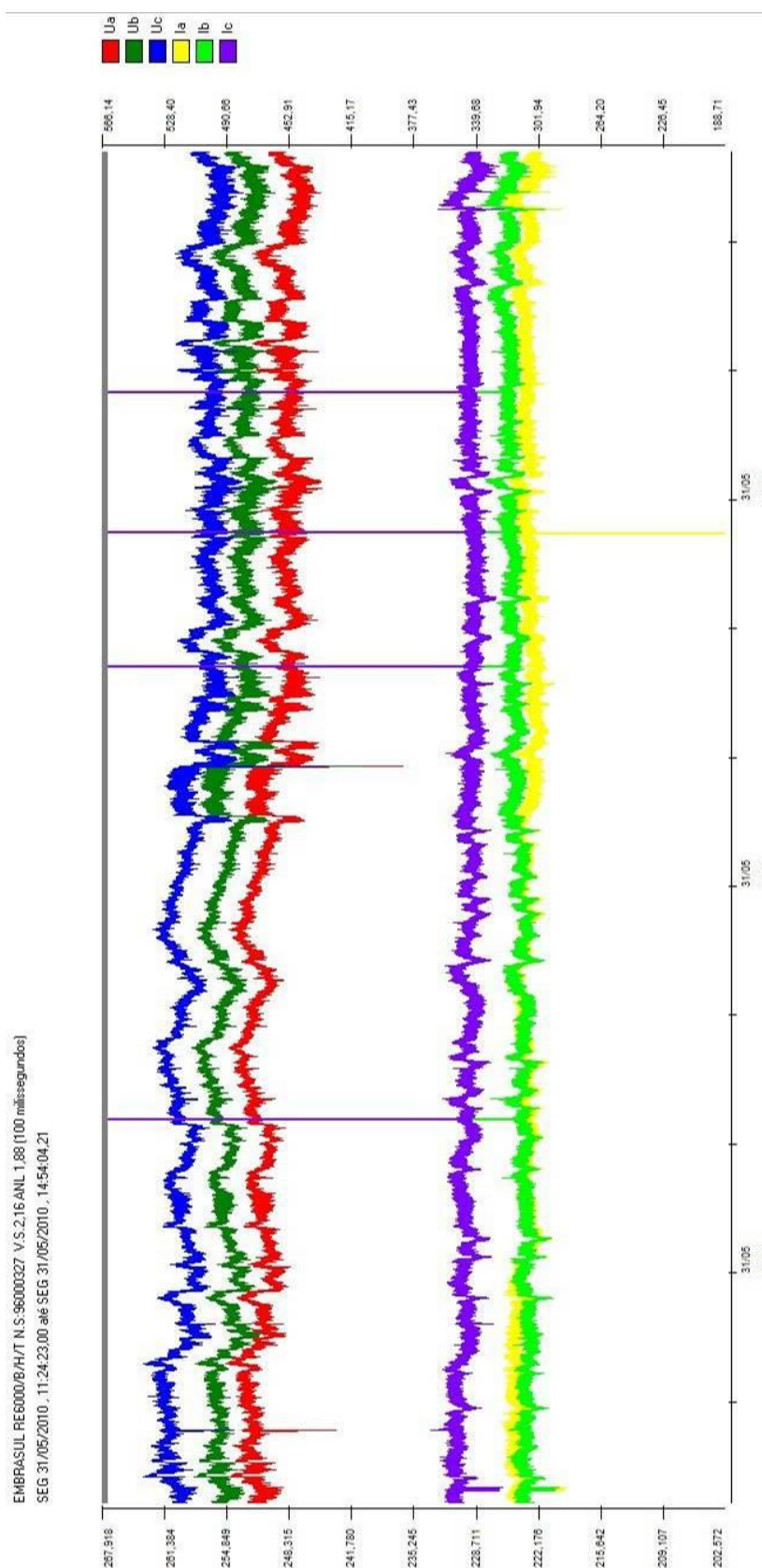


Figura 18 –Medições de tensão e corrente na entrada do CCM Concentração

c) Gráfico das Medições de Potências Ativa, Reativa e fatores de potência

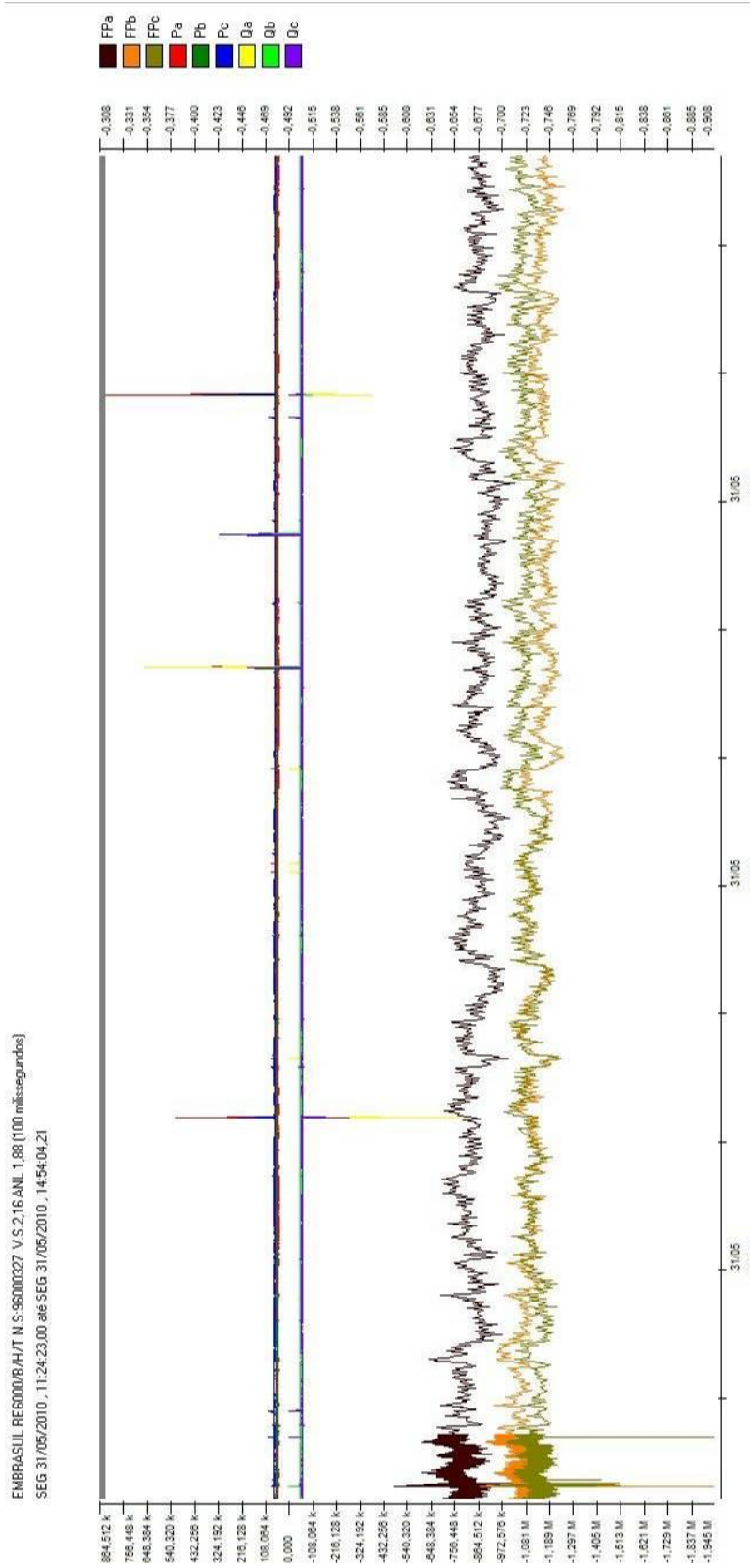
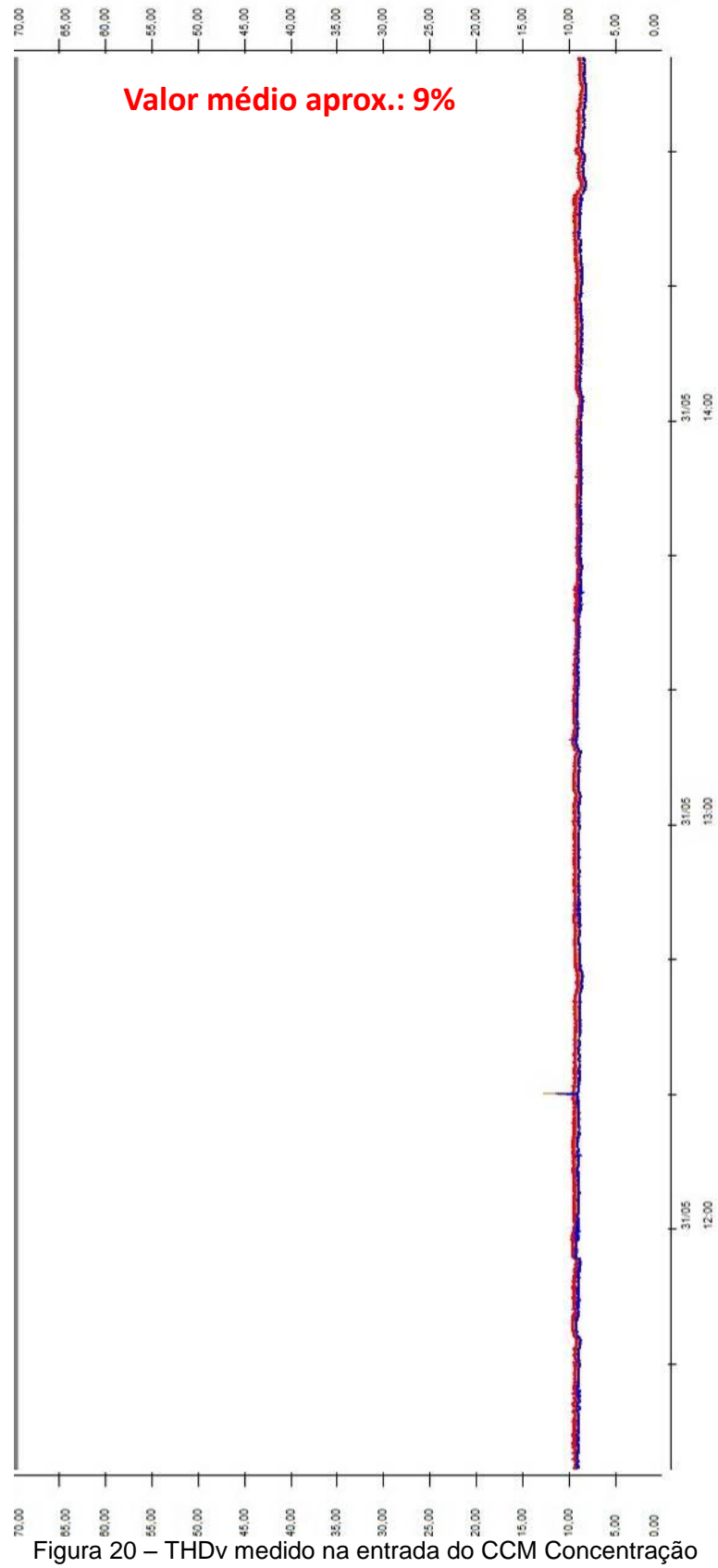


Figura 19 – Medições de potências ativa e reativa e fator de potência na entrada do CCM Concentração

d) Gráfico das Medições de THDv nas Três fases



CAPÍTULO IV – SIMULAÇÕES, RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

A partir dos dados do sistema em estudo foram feitas simulações de forma a garantir que os resultados permitissem uma análise geral da planta da indústria e a indicação da regulação ideal dos taps dos transformadores, bem como determinar o montante e o tipo de compensação de reativos ideal (bancos de capacitores e/ou filtros harmônicos).

Os cálculos de fluxo de potência, frequências de ressonância e análise de distorções harmônicas foram executados no software SKM Power Tools, versão 6.5.1. O SKM Power Tools é uma ferramenta computacional disponível para aquisição no mercado, que possui módulos para estudos de curto-circuito, fluxo de carga, proteção, dimensionamento, energia incidente, harmônicos, entre outros. O módulo de harmônicos permite a análise da distorção harmônica de tensão e corrente em todas as barras e ramos do sistema. É possível modelar fontes de distorção de corrente, associadas aos motores, e fontes de distorção de tensão, associadas às barras do sistema.

Para o processamento dos cálculos considerou-se no ponto de conexão com a distribuidora, CEMIG, a tensão de 13,8kV como tensão nominal, ou seja, 1 P.U., a ausência de distorções harmônicas provenientes de outras fontes e adotada a potência base de 100 MVA.

Para o processamento dos cálculos foi considerada, no ponto de conexão do sistema com a concessionária, a ausência de distorções harmônicas provenientes de outras fontes.

4.1 Etapas de Processamento

A análise do sistema foi realizada conforme as seguintes etapas:

- ETAPA 1 - Verificação e correção do fator de potência geral do sistema;
- ETAPA 2 - Análise da ressonância paralela e das distorções harmônicas no sistema;

- ETAPA 3 - Análise das quedas de tensão e ajuste dos taps dos transformadores;

Os resultados dos processamentos são apresentados a seguir.

4.2 Etapa 1 - Verificação e Correção do Fator de Potência Geral do Sistema

4.2.1 Configuração 0 - Fator de Potência Natural do Sistema

Inicialmente o sistema elétrico foi simulado operando sem bancos de capacitores, a fim de se verificar o fator de potência natural do sistema no ponto de acoplamento com a concessionária.

Baseando-se nestas considerações, obtiveram-se os seguintes resultados:

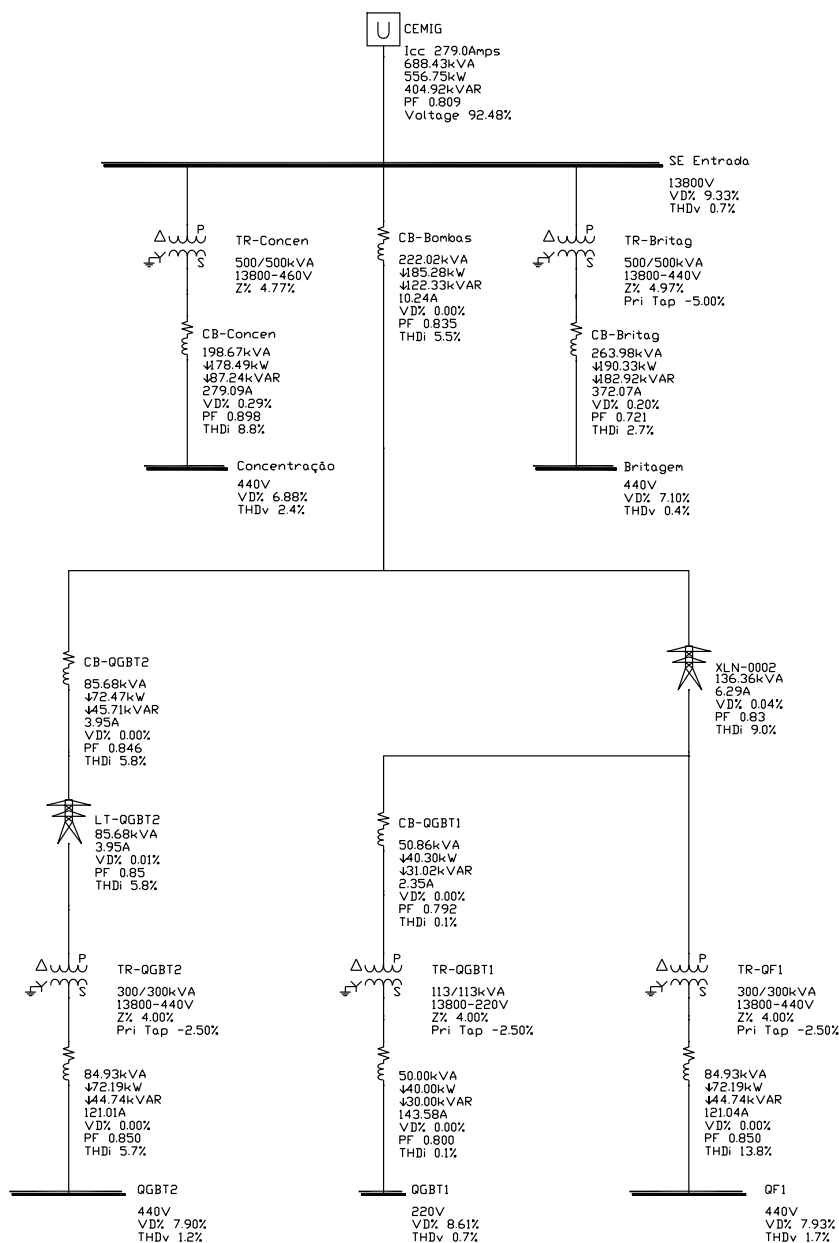


Figura 21 – Resultados obtidos para a configuração 0

Conforme se pode observar, a potência reativa demandada na entrada do sistema é de aproximadamente 405 kVAR, resultando em um fator de potência geral de 0,81 indutivo.

4.2.2 Configuração 1 - Bancos de Capacitores (Configuração Atual)

Uma vez que a configuração 1 corresponde à utilização de alguns bancos fracionados em estágios cujo chaveamento é realizado por controladores automáticos, verifica-se que o fator de potência variará conforme a demanda de reativos pelas cargas do sistema. Entretanto, verificou-se durante a realização das medições que os bancos de capacitores conectados ao CCM Britagem não fornecem a potência reativa nominal, evidenciando que os mesmos possuem unidades capacitivas danificadas. Verificou-se também que os capacitores utilizados nos bancos automáticos de 300kVAr dos CCMs Britagem e Concentração não possuem nenhum sobredimensionamento, o que inviabiliza seu uso em sistemas com presença de distorções harmônicas. Desta forma, optou-se por modelar esta configuração de acordo com a potência reativa real compensada por estes bancos.

Conforme se pode observar nos resultados apresentados no item 4.2.1 – Configuração 0, tem-se uma demanda média de 190kW e um fator de potência de 0,99 indutivo no CCM Britagem. Para o CCM Concentração, tem-se uma demanda média de 170kW e um fator de potência de 0,71 capacitivo.

Analisando-se estes resultados, verifica-se que os bancos de capacitores conectados ao CCM Britagem apresentam unidades capacitivas queimadas, uma vez que os mesmos não fornecem sua potência reativa nominal.

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos para os bancos de capacitores fracionados bem como o banco de capacitores de 215kVAr conectado ao CCM Britagem, os quais foram modelados com potências reativas compatíveis com os valores reais medidos em campo (260kVAr no CCM Concentração e 160kVAr no CCM Britagem):

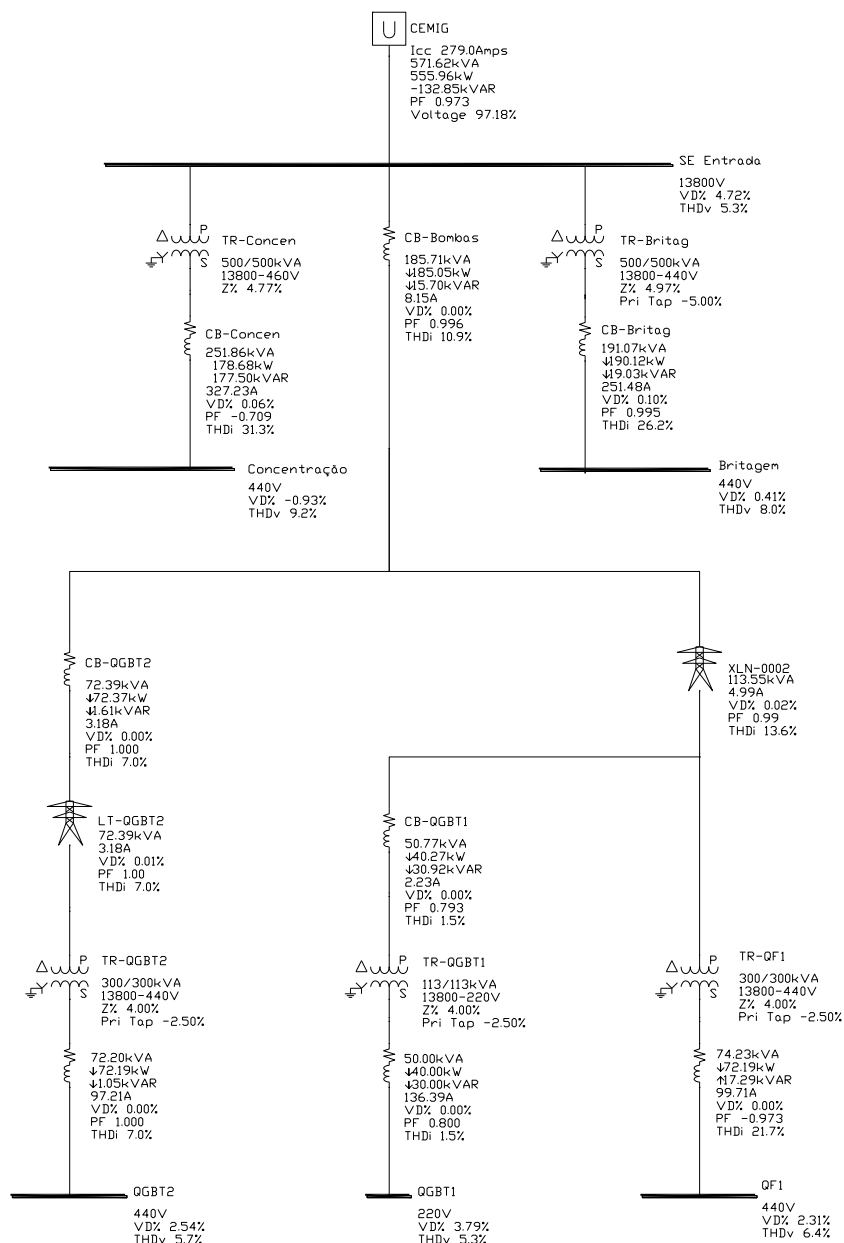


Figura 22 – Resultados obtidos para a configuração 1

Conforme se pode observar, a potência reativa demandada na entrada do sistema corresponde a -132,45kVAR, resultando em um fator de potência em torno de 0,97 capacitivo.

4.2.3 Configuração 2 - Utilização de Filtros Harmônicos

Abaixo são apresentados os resultados obtidos para a configuração 2, onde considerou-se uma compensação de reativos de 100kVAR no CCM Concentração e de 200kVAR conectada ao CCM Britagem em substituição aos bancos de capacitores atualmente instalados nos painéis CCM Britagem e CCM Concentração:

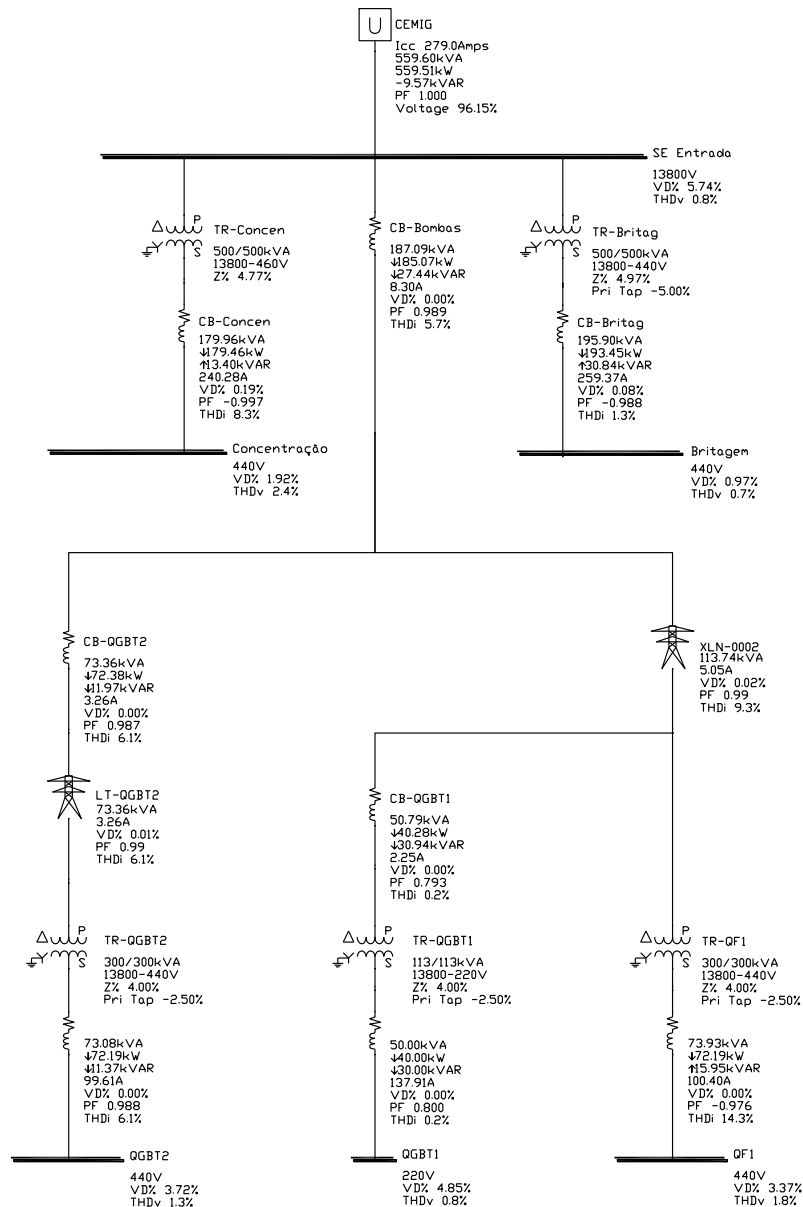


Figura 23 – Resultados obtidos para a configuração 2

Para uma variação de carga total de mais ou menos 20%, obtiveram-se fatores de potência gerais de 0,97 capacitivo e 0,99 indutivo respectivamente.

Conforme se pode observar, optou-se por dimensionar o novo sistema de correção de reativos de forma a atingir um fator de potência geral próximo de 1 (unitário), garantindo assim a adequada correção de reativos e filtragem harmônica quando da ocorrência de variações de carga/demanda do sistema, bem como obter um fator de potência adequado durante todo o período de operação.

4.3 Etapa 2 - Análise da Ressonância Paralela e Distorções Harmônicas no Sistema

Após a verificação do fator de potência geral, analisou-se o efeito dos bancos de capacitores sobre a impedância do sistema, bem como os níveis de distorção harmônica de tensão (THDv) resultantes.

São apresentados nos itens a seguir os resultados das medições de distorções harmônicas, bem como os gráficos de ressonância paralela, distorções harmônicas individuais de tensão e forma de onda da tensão para o CCM Concentração e o CCM Britagem de 440V.

4.3.1 Configuração 1 - Condição Atual

- Ressonância paralela - gráfico impedância x frequência

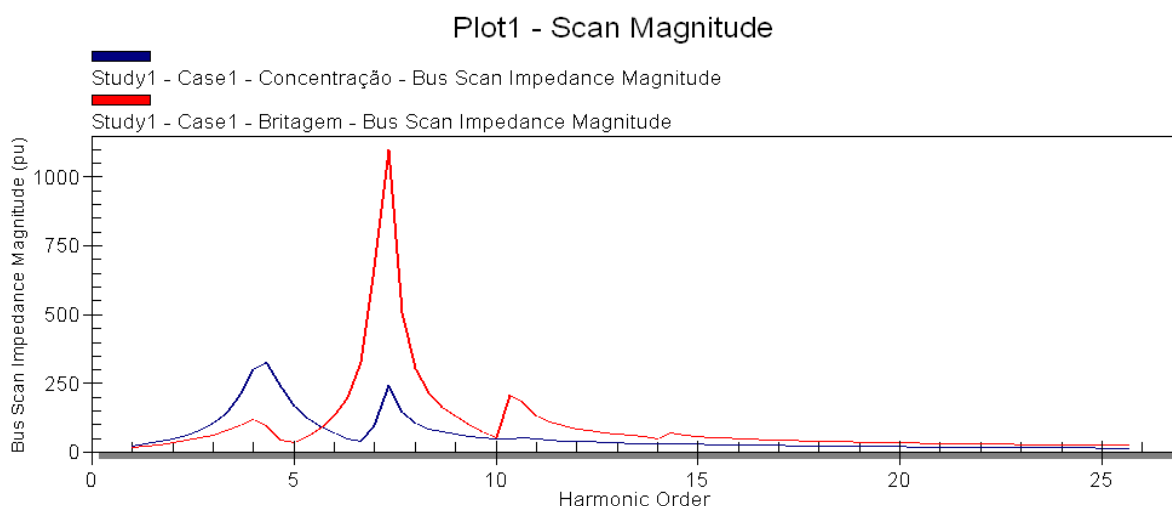


Figura 24 – Gráfico impedância x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)

- Distorções harmônicas individuais de tensão - gráfico tensão x frequência

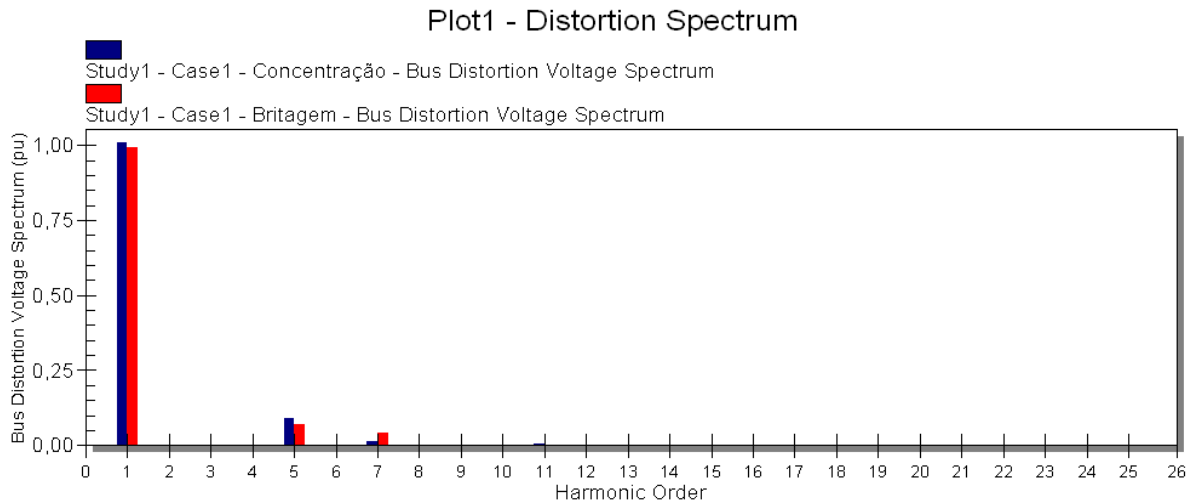


Figura 25 – Espectro de harmônicos - tensão x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)

- Forma de onda de tensão

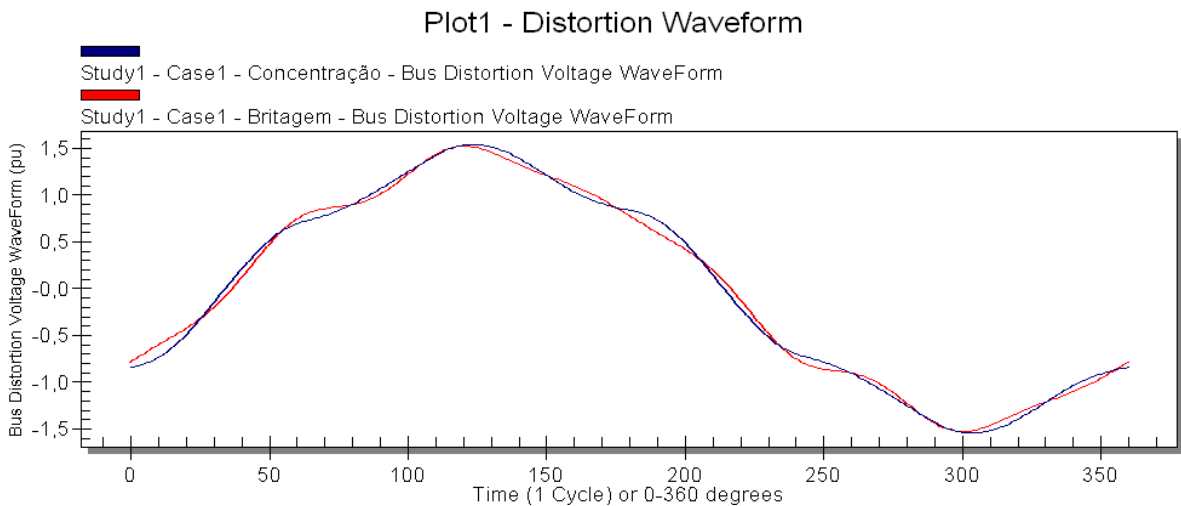


Figura 26 – Gráfico da forma de onda de tensão nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)

- Níveis de distorção harmônica total de tensão - THDv

THDv na barra do CCM Concentração de 440V (%)	THDv na barra do CCM Britagem de 440V (%)
9,2	8,0

Tabela 13 - Níveis de THDv nas barras do sistema

Os resultados das medições e simulações apresentadas, mostram que os THDv's nas barras apresentadas se encontram acima do limite de 5% recomendado no guia IEEE Std. 519. Observa-se também que os valores resultantes da simulação encontram-se próximos aos resultados das medições, apresentados no item 3.9.3.

As frequências de ressonância se encontram próximas à 7ª ordem harmônica no CCM Britagem, e à 5ª ordem harmônica no CCM Concentração, amplificando assim as distorções harmônicas de mesma frequência geradas pelas cargas não lineares destes painéis.

Baseando-se nos resultados obtidos, verifica-se a necessidade de uma alternativa para o sistema, apresentada no item a seguir.

4.3.2 Configuração 2 – Recomendação: Instalação de Filtros Harmônicos

Para esta configuração considerou-se um filtro harmônico de 100kVAr sintonizado na 5ª ordem harmônica na barra do CCM Concentração, e um filtro harmônico de 200kVAr dessintonizado na barra do CCM Britagem, ambos substituindo os bancos de capacitores atualmente alimentados por estes painéis.

O filtro harmônico sintonizado na 5ª harmônica tem como objetivo absorver as distorções harmônicas de mesma frequência provenientes das cargas não lineares, reduzindo conseqüentemente o nível de THDv do sistema.

O filtro harmônico do tipo dessintonizado é semelhante ao filtro sintonizado regular, porém sua sintonia é determinada em uma ordem harmônica onde não existem distorções harmônicas geradas pelas cargas não lineares, tendo como função apenas deslocar a frequência de ressonância do sistema. Este filtro tem como vantagem o menor custo em relação ao filtro sintonizado, uma vez que o mesmo não irá absorver as distorções harmônicas no sistema e, deste modo, demanda um menor sobredimensionamento de suas unidades capacitivas.

Uma observação importante refere-se ao guia IEEE Std. 1531-2003 que recomenda que filtros harmônicos sejam sintonizados em 3% a 15% abaixo da frequência de sintonia desejada. Por esta razão, adotou-se para o filtro sintonizado a frequência de sintonia correspondente à 4,5ª ordem harmônica, e para o filtro dessintonizado uma frequência de sintonia na 3,5ª ordem.

A seguir são apresentados os resultados obtidos:

- Ressonância paralela - gráfico impedância x frequência

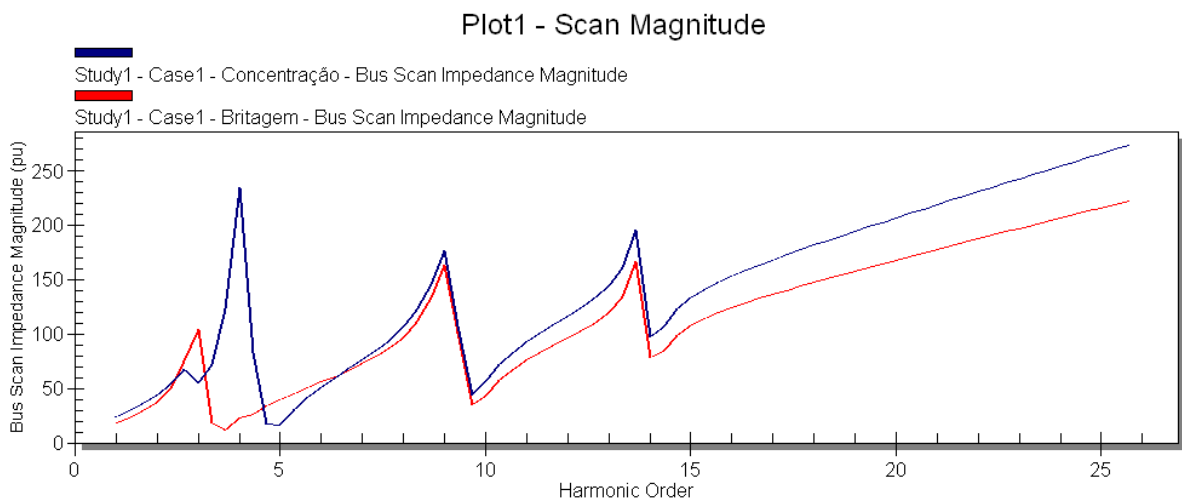


Figura 27 - gráfico impedância x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)

- Distorções harmônicas individuais de tensão - gráfico tensão x frequência

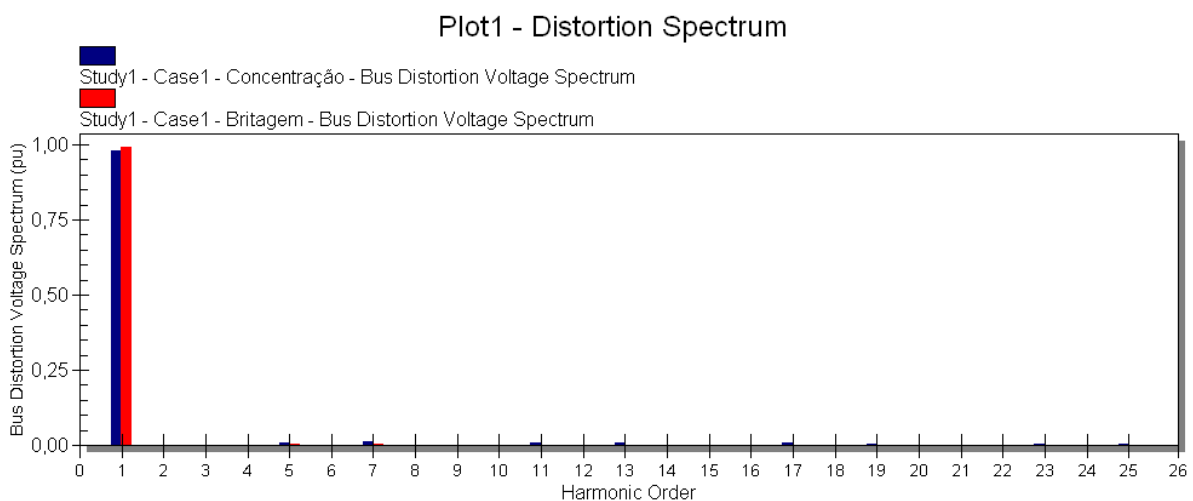


Figura 28 - Espectro de harmônicos - tensão x frequência nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)

- Forma de onda de tensão

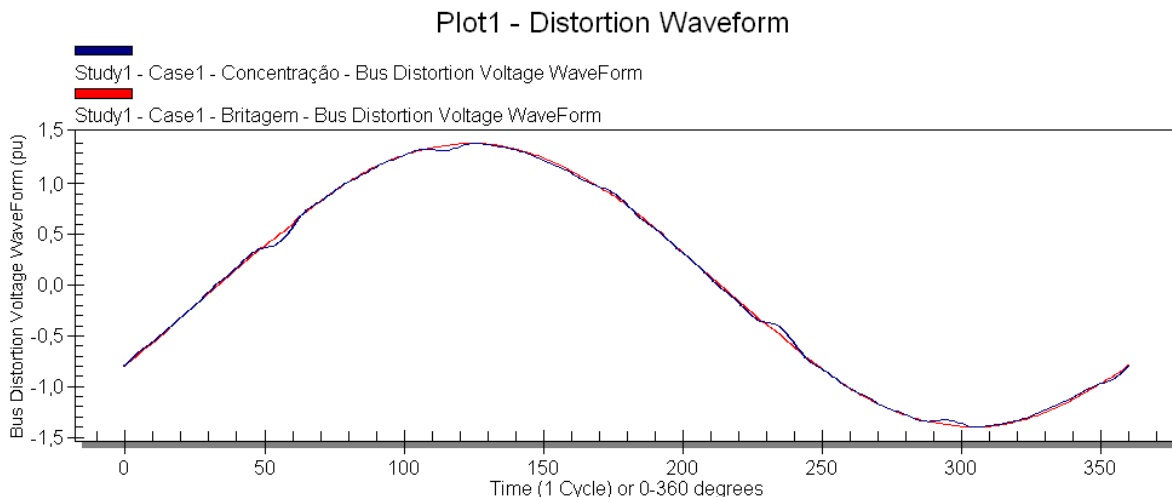


Figura 29 - Gráfico da forma de onda de tensão nos CCMs Concentração (azul) e Britagem (vermelho)

- Níveis de distorção harmônica total de tensão - THDv

THDv na barra do CCM Concentração de 440V (%)	THDv na barra do CCM Britagem de 440V (%)
2,4	0,7

Tabela 14 - Níveis de THDv nas barras do sistema

Os resultados apresentados mostram que com a instalação dos filtros harmônicos recomendados o sistema apresentou ressonâncias que não coincidem com as frequências críticas do sistema. Desta forma, verifica-se que as distorções harmônicas individuais de tensão são bastante reduzidas em comparação com a configuração anterior, conforme se pode observar na figura 14. Pode-se verificar também que os níveis de THDv em ambas as barras dos CCMs Concentração e Britagem encontram-se dentro do limite recomendado no guia IEEE Std. 519.

4.4 Etapa 3 - Análise das Quedas de Tensão e Ajuste de Taps dos Transformadores

A avaliação dos níveis de tensão das barras do sistema foi feita de forma a determinar os taps ideais para os transformadores, que possibilitem níveis de tensão próximos de 1 P.U. nas barras.

Os taps ideais calculados para os transformadores e os respectivos resultados são apresentados abaixo:

Transformador	Tensão nominal (kV)	Tap primário (%)	
		Config. 1	Config. 2
Alim. CCM Concentração	13,8-0,44	0,0	0,0
Alim. CCM Britagem	13,8-0,44	-5,0	-5,0
Alim. QGBT 1	13,8-0,22	-2,5	-5,0
Alim. QGBT 2	13,8-0,44	-2,5	-5,0
Alim. QF 1	13,8-0,44	-2,5	-5,0

Tabela 15 - Taps recomendados para os transformadores principais, conforme alternativas estudadas

Barra	Tensão nominal (kV)	Queda de tensão (%)	
		Config. 1	Config. 2
CCM Concentração	0,44	-0,93	1,92
CCM Britagem	0,44	0,41	0,97
Alim. QGBT 1	0,44	3,79	2,22
Alim. QGBT 2	0,22	2,54	1,1
Alim. QF 1	0,44	2,31	0,74

Tabela 16 - Quedas de tensão calculadas para os taps recomendados

Observação: os valores apresentados com o sinal negativo representam sobretensões.

Para a configuração proposta (configuração 2), variações da carga total demandada em mais ou menos 20% resultam em variações de tensão de -2,1% e 4,9% respectivamente, valores estes de queda de tensão nas barras do sistema situados dentro dos limites estabelecidos como premissa, considerando a regulação de taps recomendada.

CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados das medições e simulações apresentadas no capítulo anterior indicaram a presença de níveis consideráveis de distorção harmônica no sistema e comprovaram que a queima das unidades capacitivas existentes teve como causa as sobretensões resultantes da amplificação das distorções harmônicas oriundas dos conversores de frequência, pois o montante total de reativos inicial de 600kVAr (300kVAr em cada CCM) é excessivo para as cargas do sistema. Além disto, o uso de bancos de capacitores automáticos fez com que determinadas combinações de estágios provoquem ressonância nas barras do sistema, que amplificaram as distorções harmônicas geradas pelos inversores de frequência e conversores/retificadores instalados.

Pela análise técnica realizada é possível concluir que a configuração 2 - filtro harmônico de 100kVAr sintonizado na 5ª ordem no CCM Concentração, e filtro harmônico de 200kVAr dessintonizado no CCM Britagem - mostra-se como a melhor solução a ser adotada para o sistema em questão. Conforme se pode observar nos resultados apresentados, esta solução resulta em drástica redução dos níveis de distorções harmônicas: o THDv na barra do CCM Concentração foi reduzido de 9,2% para 2,4%, e o THDv na barra do CCM Britagem foi reduzido de 8,0% para 0,7%. A implantação dos filtros também garantirá um fator de potência adequado (praticamente unitário) no ponto de conexão com a concessionária.

Além da minimização dos níveis de distorção harmônica no sistema, conclui-se que o fator de potência na entrada do sistema elétrico estará dentro dos limites estipulados, adotando-se o montante total de reativos recomendado de 300kVAr; e também que as variações de tensão nas barras do sistema estarão conforme exigido, considerando os transformadores operando com os taps recomendados neste estudo.

Além disto, cabe ainda observar que:

- Os filtros harmônicos recomendados substituirão os bancos de capacitores de 300kVAr e 215kVAr alimentados pelos painéis CCM Britagem e CCM Concentração, uma vez que os novos componentes terão a função de compensação de reativos e filtragem de distorções harmônicas no sistema.
- É imprescindível que os filtros harmônicos a serem implantados permaneçam em funcionamento durante a operação do sistema, uma vez que o desligamento de algum deles acarretará em elevação dos níveis de distorções harmônicas presentes no sistema. Caso o filtro necessite ser desligado, recomenda-se que as maiores cargas não lineares (inversores de frequência e conversores/retificadores) sejam também retiradas de operação. Para isso, é interessante automatizar o desligamento dos filtros através de intertravamento com o sistema de controle da planta, ou mesmo a utilização de dispositivos temporizadores (timers), os quais acionarão os filtros em intervalos específicos (trocas de turnos ou demais eventos recorrentes onde haja o desligamento das cargas industriais de forma geral).
- Durante a elaboração deste estudo, foi verificada a possibilidade de correção do fator de potência e dos níveis de distorções harmônicas através da variação de estágios dos bancos de capacitores existentes; entretanto os resultados não foram satisfatórios, o que implica na solução recomendada, baseada na utilização de filtros harmônicos.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO

O conhecimento de perturbações presentes nos sistemas elétricos merece uma atenção especial, devendo ser tomadas medidas corretivas para mitigar o problema, seja através da utilização de filtros harmônicos, seja por outros meios.

Foram apresentadas as considerações e resultados de uma análise baseada em medições e simulações computacionais, envolvendo a instalação de filtros harmônicos passivos em uma indústria que possui motores acionados através de conversores de frequência, para análise nos impactos nas grandezas elétricas e qualidade da energia elétrica; esta solução se mostrou eficaz, reduzindo de forma significativa os níveis de distorções harmônicas presentes no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 7.1 Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE STD 141: IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR ELECTRIC POWER DISTRIBUTION FOR INDUSTRIAL PLANTS", New York, 1993.
- 7.2 Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE STD 519: IEEE RECOMMENDED PRACTICE AND REQUIREMENTS FOR HARMONIC CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS", New York, 1992.
- 7.3 Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE STD 1531: IEEE GUIDE FOR APPLICATION AND SPECIFICATION OF HARMONIC FILTERS", New York, 1992.
- 7.4 Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR-5282: CAPACITORES DE POTÊNCIA EM DERIVAÇÃO PARA SISTEMAS DE TENSÃO NOMINAL ACIMA DE 1000V – ESPECIFICAÇÃO", São Paulo, 1998.
- 7.5 International Electrotechnical Commission, "IEC 1000, PART 2: ENVIRONMENT, SECTION 4: COMPATIBILITY LEVELS IN INDUSTRIAL PLANTS FOR LOW-FREQUENCY CONDUCTED DISTURBANCES".
- 7.6 ANEEL, "PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST, MÓDULO 8 - QUALIDADE DA ENERGIA".
- 7.7 Documento ONS – "PROCEDIMENTOS DE REDE PARA CONCESSIONÁRIAS".
- 7.8 Associação Brasileira de Normas Técnicas, "NBR-5356: TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA", São Paulo, 2007.
- 7.9 H. L. dos Santos, J. O. S. Paulino, M. L. Murta, "INFLUÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NA PROTEÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES", VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, agosto de 2009.
- 7.10 N. Santos, F. H. Costa, J. C. de Oliveira, "AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS METODOLOGIAS PARA A REPRESENTAÇÃO DE CONSUMIDORES VISANDO O COMPARTILHAMENTO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS", VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, agosto de 2009.
- 7.11 N. C. Jesus, J. R. Cogo, K. A. Tavares, "MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA: PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE HARMÔNICOS", VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, agosto de 2009.

- 7.12 B. D. S. José; A. B. Vasconcellos; A. V. Festa; C. M. da S. Neto; T. V. da Silva; P. N. Cocchia; “APLICAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS EM UM SISTEMA DE ACIONAMENTO DE MÁQUINAS MOTRIZES”, IX Conferência Internacional de Aplicações Industriais, novembro de 2010.
- 7.13 N. C. de Jesus, H. R. P. M. de Oliveira, “EFEITO DE BANCOS DE CAPACITORES NA AMPLIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO”, XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, agosto de 2006.
- 7.14 A. A. C. Figueiredo, M. A. S. Pereira, C. A. Canesin, J. C. Rossi, L. C. O. de Oliveira, F. T. Wakabayashi, R. A. N. de Oliveira, “MODELAGEM E PREVISÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO PROVOCADAS POR CARGAS NÃO-LINEARES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”.
- 7.15 INDUCON, “Manual de Capacitores de Potência”.
- 7.16 WEG - Guia Técnico - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM.
- 7.17 Manual do Software SKM Power Tools for Windows – versão 6.5.1.
- 7.18 Manual do Analisador de Energia EMBRASUL RE-6000.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS FILTROS HARMÔNICOS

8.1 Especificação Técnica do Filtro Harmônico de 100kVAr Sintonizado na 5ª Ordem

8.1.1 *Descrição Geral do Filtro*

Um Filtro de harmônicos sintonizado no harmônico de 4,8ª ordem, com potência nominal de 100 kVAr em 440 V, conexão duplo estrela isolada.

8.1.2 *Condições do Sistema Elétrico*

- Tensão Nominal: 440 V;
- Número de Fases: 3;
- Frequência: 60 Hz;
- Nível de curto-circuito trifásico: 25 kA;
- Neutro do Sistema Elétrico: Solidamente aterrado.

8.1.3 *Condições Ambientais*

O filtro deverá ser previsto para operação em regime contínuo, 24 horas por dia, 365 dias por ano, considerando as seguintes condições ambientais:

- Temperatura ambiente máxima: 40°C;
- Umidade relativa média: 60%;
- Atmosfera: presença de poeira típica de processos de mineração.
- Proximidade do mar: não;
- Altitude máxima: < 1000m.

8.1.4 *Capacitores*

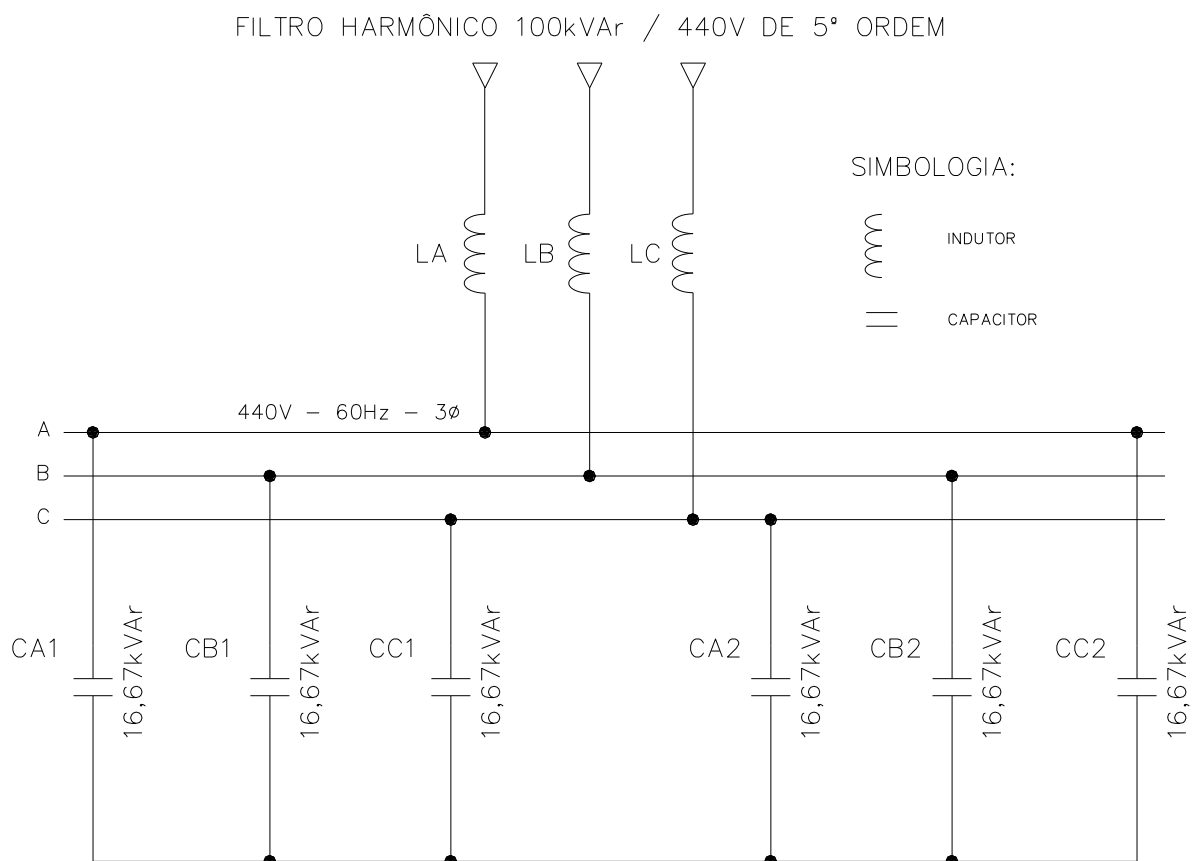
- Capacidade nominal: 100 kVAr em 440 V
- Capacidade máxima: 156 kVAr em 550 V
- Tensão Nominal: 440 V
- Tensão Máxima: 550 V
- Número de fases: 3
- Frequência: 60 Hz

- Corrente de curto-circuito trifásico: 25 kA
- Número de unidades capacitivas: 6 (o filtro deverá ser projetado para operar com potência integral, não havendo necessidade de chaveamento de frações do mesmo).
- Fusíveis internos nas unidades capacitivas (auto-protegido).

8.1.5 Reatores

- Indutância nominal: 0,223 mH
- Corrente térmica nominal mínima em 60 Hz: 250 A
- Classe de tensão: 1 kV
- Frequência de sintonia para o banco: 288 Hz (4,8^o harmônico)
- Fator de Qualidade (Q) na frequência de 60 Hz: 20

8.1.6 Diagrama Unifilar Orientativo



8.2 Especificação Técnica do Filtro Harmônico de 200kVAr Dessintonizado - Configuração 2

8.2.1 Descrição Geral do Filtro

Um Filtro de harmônicos dessintonizado (sintonia no harmônico de 3,5ª ordem), com potência nominal de 200 kVAr em 440 V, conexão duplo estrela isolada.

8.2.2 Condições do Sistema Elétrico

- Tensão Nominal: 440 V;
- Número de Fases: 3;
- Frequência: 60 Hz;
- Nível de curto-circuito trifásico: 25 kA;
- Neutro do Sistema Elétrico: Solidamente aterrado.

8.2.3 Condições Ambientais

O filtro deverá ser previsto para operação em regime contínuo, 24 horas por dia, 365 dias por ano, considerando as seguintes condições ambientais:

- Temperatura ambiente máxima: 40°C;
- Umidade relativa média: 60%;
- Atmosfera: presença de poeira típica de processos de mineração.
- Proximidade do mar: não;
- Altitude máxima: < 1000m.

8.2.4 Capacitores

- Capacidade nominal: 200 kVAr em 440 V
- Capacidade máxima: 265 kVAr em 506 V
- Tensão Nominal: 440 V
- Tensão Máxima: 506 V
- Número de fases: 3
- Frequência: 60 Hz
- Corrente de curto-circuito trifásico: 25 kA

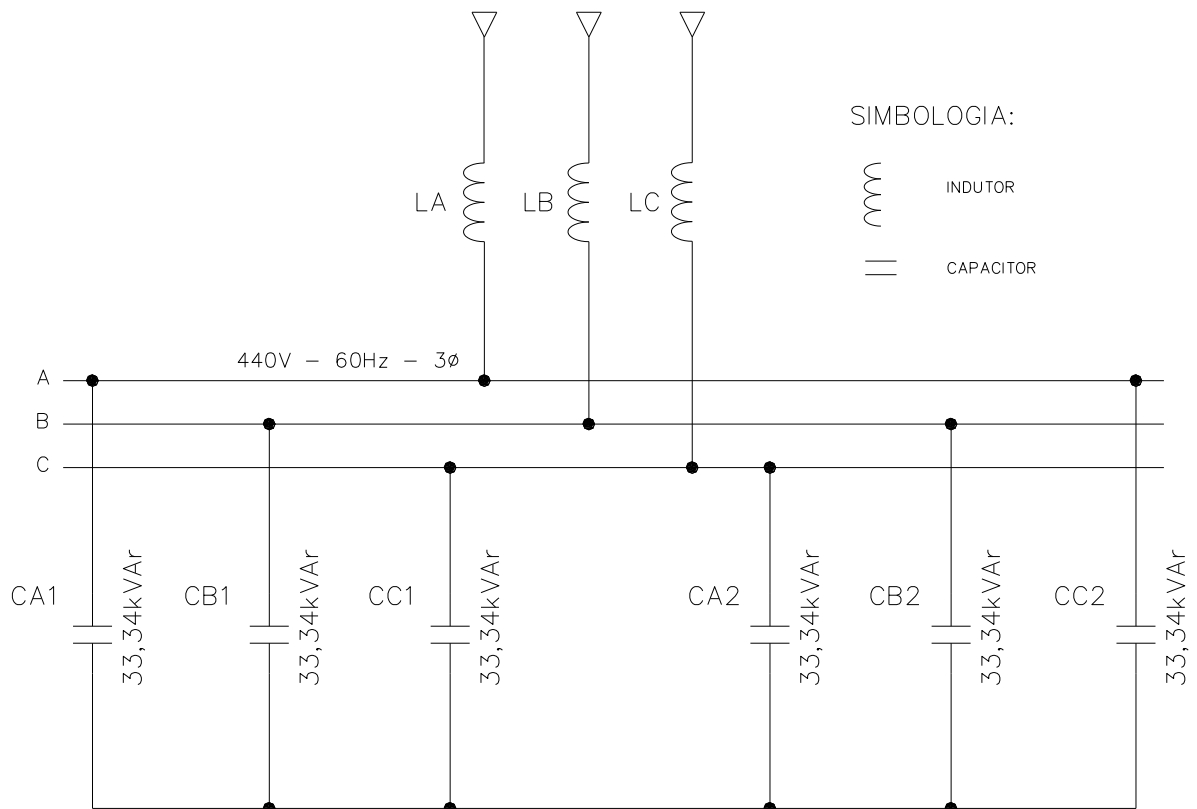
- Número de unidades capacitivas: 6 (o filtro deverá ser projetado para operar com potência integral, não havendo necessidade de chaveamento de frações do mesmo).
- Fusíveis internos nas unidades capacitivas (auto-protegido).

8.2.5 Reatores

- Indutância nominal: 0,210 mH
- Corrente térmica nominal mínima em 60 Hz: 450 A
- Classe de tensão: 1 kV
- Frequência de sintonia para o banco: 210 Hz (3,5º harmônico)
- Fator de Qualidade (Q) na frequência de 60 Hz: 20

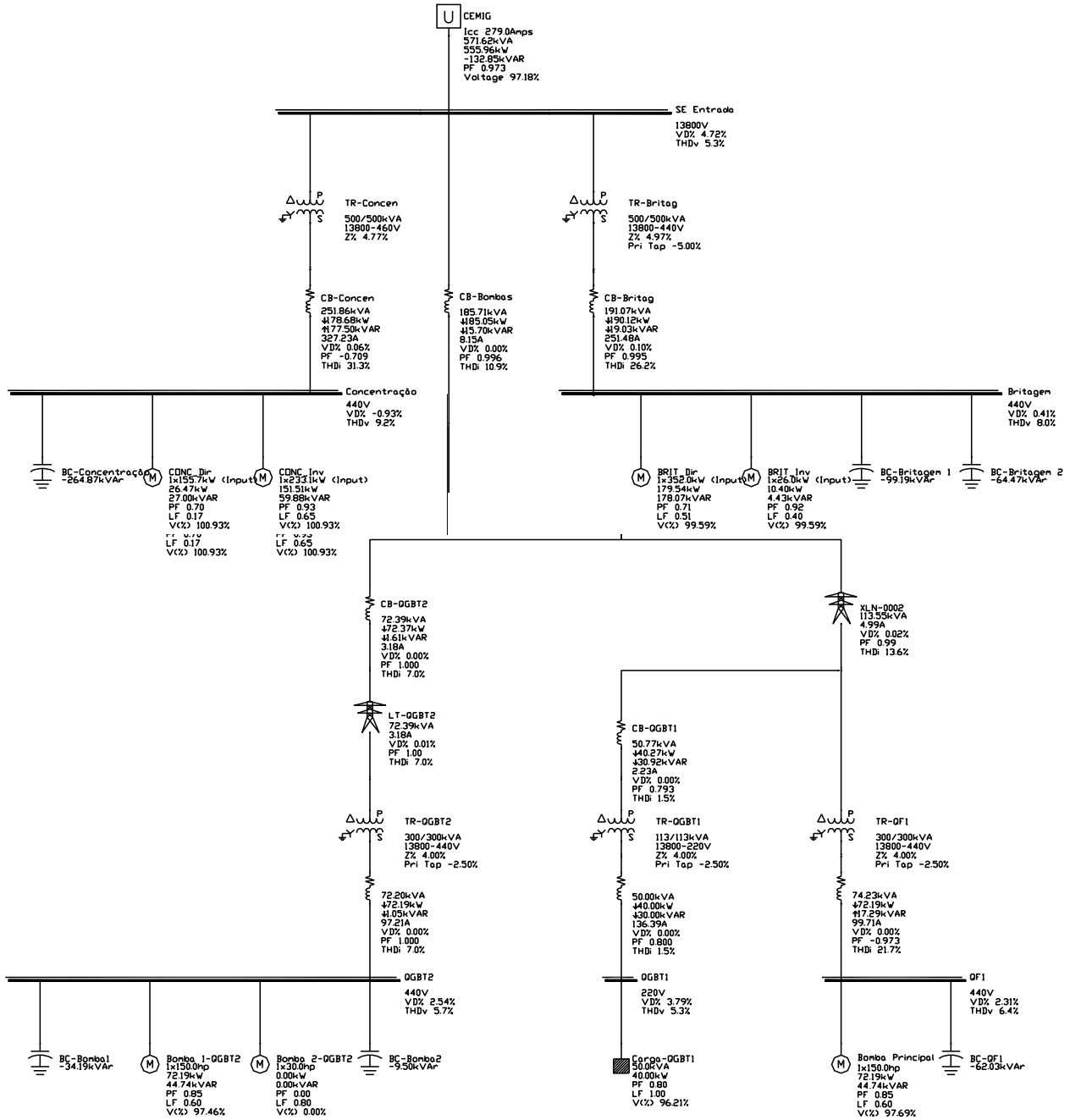
8.2.6 Diagrama Unifilar Orientativo

FILTRO HARMÔNICO 200kVAr / 440V DE DESSINTONIA (4º ORDEM)

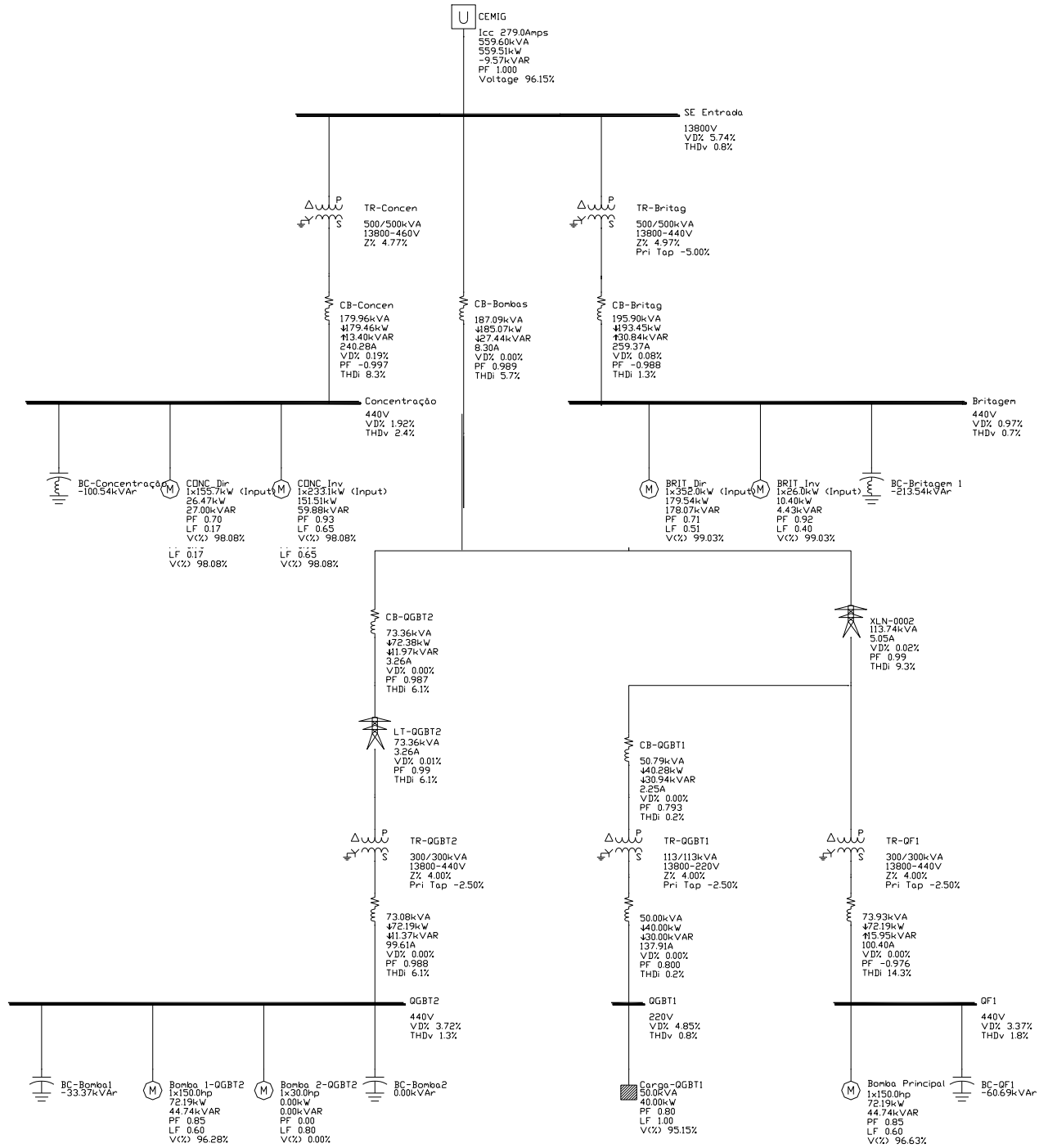


ANEXO B – DIAGRAMAS UNIFILARES DE FLUXO DE POTÊNCIA E ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

9.1 Configuração 1



9.2 Configuração 2



ANEXO D – RELATÓRIOS DE FLUXO DE POTÊNCIA

10.1 Configuração 1

SOLUTION PARAMETERS
BRANCH VOLTAGE CRITERIA : 3.00 %
BUS VOLTAGE CRITERIA : 5.00 %
UTILITY IMPEDANCE : YES
TRANSFORMER PHASE SHIFT : YES
LTC TRANSFORMER : NO
CALCULATION METHOD : Newton Method
SOLUTION METHOD : EXACT
ALL PU VALUES ARE EXPRESSED ON A 100 MVA BASE
LOAD FLOW IS BASED ON DIRECTLY CONNECTED LOADS.
AND WITH APPLIED FIRST LEVEL DEMAND OR LOAD FACTORS.
LOAD ANALYSIS INCLUDES ALL LOADS.
<<PERCENT VOLTAGE DROPS ARE BASED ON NOMINAL DESIGN VOLTAGES>>

SWING GENERATORS
SOURCE NAME VOLTAGE ANGLE
=====
CEMIG 1.020 0.00

BUS VOLTAGE CONVERGENCY CRITERIA: 0.00001000 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Concentração -0.57694542 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem 0.05790002 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem 0.00043952 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem -0.00000002 PU

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW ANALYSIS (SWING GENERATORS)

SOURCE VOLTAGE ANGLE KW KVAR VD% (UTILITY IMPEDANCE)
CEMIG 1.020 0.00 555.96 -132.85 2.82 12.98831 +j 7.49425

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW ANALYSIS

VOLTAGE EFFECT ON LOADS MODELED
VOLTAGE DROP CRITERIA: BRANCH = 3.00% BUS = 5.00%

==== BUS: Britagem DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 438 %VD: 0.41
===== PU BUS VOLTAGE: 0.996 ANGLE: -34.6 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0005 CB-Britag FEEDER AMPS: 251.5 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.10
PROJECTED POWER FLOW: 189.9 KW 18.8 KVAR 190.9 KVA 1.00 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.2 KW 0.2 KVAR 0.3 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 189.9 KW 18.8 KVAR

```

==== BUS: ConcentraÁ,o DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 444 %VD: -0.93
===== PU BUS VOLTAGE: 1.009 ANGLE: -34.9 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0004 CB-Concen FEEDER AMPS: 327.2 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.06
PROJECTED POWER FLOW: 178.0 KW -178.0 KVAR 251.7 KVA 0.71 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.7 KW 0.5 KVAR 0.9 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 178.0 KW -178.0 KVAR

==== BUS: QF1 DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 430 %VD: 2.31
===== PU BUS VOLTAGE: 0.977 ANGLE: -34.1 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0019 C3 FEEDER AMPS: 99.7 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 72.2 KW -17.3 KVAR 74.2 KVA 0.97 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 72.2 KW -17.3 KVAR

==== BUS: QGBT1 DESIGN VOLTS: 220 BUS VOLTS: 212 %VD: 3.79
===== PU BUS VOLTAGE: 0.962 ANGLE: -34.1 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0020 C2 FEEDER AMPS: 136.4 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 40.0 KW 30.0 KVAR 50.0 KVA 0.80 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 40.0 KW 30.0 KVAR

==== BUS: QGBT2 DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 429 %VD: 2.54
===== PU BUS VOLTAGE: 0.975 ANGLE: -34.0 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0018 C1 FEEDER AMPS: 97.2 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 72.2 KW 1.0 KVAR 72.2 KVA 1.00 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 72.2 KW 1.0 KVAR

==== BUS: SE Entrada DESIGN VOLTS: 13800 BUS VOLTS: 13148 %VD: 4.72
===== PU BUS VOLTAGE: 0.953 ANGLE: -3.5 DEGREES
*** SWING GENERATOR:CEMIG 555.96 KW -132.85 KVAR
LOAD TO: BUS-0017 CB-Bombas FEEDER AMPS: 8.2 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 185.0 KW 15.7 KVAR 185.7 KVA 1.00 LAGGING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA

LOAD TO: BUS-0005 TR-Britag TRANSF AMPS: 8.4 VOLTAGE DROP: -610. %VD: -4.42$
PROJECTED POWER FLOW: 190.9 KW 22.6 KVAR 192.2 KVA 0.99 LAGGING
LOSSES THRU FEEDER: 0.8 KW 3.6 KVAR 3.7 KVA
Primary Fixed Tap: -5.000% Sec. Fixed Tap: 0.000%

LOAD TO: BUS-0004 TR-Concen TRANSF AMPS: 10.9 VOLTAGE DROP: -789. %VD: -5.71$
PROJECTED POWER FLOW: 180.0 KW -171.2 KVAR 248.4 KVA 0.72 LAGGING
LOSSES THRU FEEDER: 1.4 KW 6.3 KVAR 6.5 KVA
Primary Fixed Tap: 0.000% Sec. Fixed Tap: 4.545%

```

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW BUS DATA SUMMARY

BUS NAME	BASE VOLT	PU VOLT	BUS NAME	BASE VOLT	PU VOLT
Britagem	440.	0.9959	BUS-0004	440.	1.0099
BUS-0005	440.	0.9970	BUS-0009	13800.	0.9527
BUS-0013	13800.	0.9525	BUS-0015	13800.	0.9527
BUS-0016	13800.	0.9525	BUS-0017	13800.	0.9528
BUS-0018	440.	0.9746	BUS-0019	440.	0.9769
BUS-0020	220.	0.9621	Concentra�o	440.	1.0093
QF1	440.	0.9769	QGBT1	220.	0.9621
QGBT2	440.	0.9746	SE Entrada	13800.	0.9528

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW BRANCH DATA SUMMARY

BRANCH NAME	FROM NAME	TO NAME	TYPE	VD%	AMPS	KVA	RATING%
TR-Britag	SE Entrada	BUS-0005	TX2	-4.42	8.44	192.22	40.35
TR-Concen	SE Entrada	BUS-0004	TX2	-5.71	10.91	248.41	52.14
CB-Concen	BUS-0004	Concentra�o	FDR	0.06	327.23	251.86	UNKOWN
CB-Britag	BUS-0005	Britagem	FDR	0.10	251.48	191.07	UNKOWN
CB-Bombas	SE Entrada	BUS-0017	FDR	0.00	8.15	185.71	UNKOWN
CB-QGBT2	BUS-0017	BUS-0009	FDR	0.00	3.18	72.39	UNKOWN
TR-QF1	BUS-0016	BUS-0019	TX2	-2.44	3.26	74.24	25.98
TR-QGBT2	BUS-0015	BUS-0018	TX2	-2.19	3.18	72.39	25.33
TR-QGBT1	BUS-0013	BUS-0020	TX2	-0.95	2.23	50.77	47.38
CB-QGBT1	BUS-0016	BUS-0013	FDR	0.00	2.23	50.77	UNKOWN
LT-QGBT2	BUS-0009	BUS-0015	FDR	0.01	3.18	72.39	1.18
XLN-0002	BUS-0017	BUS-0016	FDR	0.02	4.99	113.55	1.85
C1	BUS-0018	QGBT2	FDR	0.00	97.21	72.20	UNKOWN
C3	BUS-0019	QF1	FDR	0.00	99.71	74.23	UNKOWN
C2	BUS-0020	QGBT1	FDR	0.00	136.39	50.00	UNKOWN

*** T O T A L S Y S T E M L O S S E S ***

4. KW 13. KVAR

10.2 Configuração 2

SOLUTION PARAMETERS
BRANCH VOLTAGE CRITERIA : 3.00 %
BUS VOLTAGE CRITERIA : 5.00 %
UTILITY IMPEDANCE : YES
TRANSFORMER PHASE SHIFT : YES
LTC TRANSFORMER : NO
CALCULATION METHOD : Newton Method
SOLUTION METHOD : EXACT
ALL PU VALUES ARE EXPRESSED ON A 100 MVA BASE
LOAD FLOW IS BASED ON DIRECTLY CONNECTED LOADS.
AND WITH APPLIED FIRST LEVEL DEMAND OR LOAD FACTORS.
LOAD ANALYSIS INCLUDES ALL LOADS.
<<PERCENT VOLTAGE DROPS ARE BASED ON NOMINAL DESIGN VOLTAGES>>

SWING GENERATORS
SOURCE NAME VOLTAGE ANGLE
=====

CEMIG 1.020 0.00

BUS VOLTAGE CONVERGENCY CRITERIA: 0.00001000 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem -0.55237770 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem 0.05483971 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem 0.00038725 PU
LARGEST BUS VOLTAGE MISMATCH Britagem -0.00000002 PU

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW ANALYSIS (SWING GENERATORS)

SOURCE VOLTAGE ANGLE KW KVAR VD% (UTILITY IMPEDANCE)
CEMIG 1.020 0.00 560.06 -14.06 3.82 12.98831 +j 7.49425

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW ANALYSIS

VOLTAGE EFFECT ON LOADS MODELED
VOLTAGE DROP CRITERIA: BRANCH = 3.00% BUS = 5.00%

==== BUS: Britagem DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 436 %VD: 0.94
===== PU BUS VOLTAGE: 0.991 ANGLE: -33.8 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0005 CB-Britag FEEDER AMPS: 259.3 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.08
PROJECTED POWER FLOW: 193.3 KW -31.2 KVAR 195.8 KVA 0.99 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.2 KW 0.2 KVAR 0.3 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 193.3 KW -31.2 KVAR

==== BUS: ConcentraÁ,o DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 432 %VD: 1.85
===== PU BUS VOLTAGE: 0.982 ANGLE: -33.8 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0004 CB-Concen FEEDER AMPS: 241.3 VOLTAGE DROP: 1. %VD: 0.19
PROJECTED POWER FLOW: 179.6 KW -18.0 KVAR 180.5 KVA 1.00 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.4 KW 0.3 KVAR 0.5 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 179.6 KW -18.0 KVAR

```

==== BUS: QF1 DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 425 %VD: 3.34
===== PU BUS VOLTAGE: 0.967 ANGLE: -33.2 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0019 C3 FEEDER AMPS: 100.4 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 72.2 KW -16.0 KVAR 73.9 KVA 0.98 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 72.2 KW -16.0 KVAR

==== BUS: QGBT1 DESIGN VOLTS: 220 BUS VOLTS: 209 %VD: 4.82
===== PU BUS VOLTAGE: 0.952 ANGLE: -33.3 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0020 C2 FEEDER AMPS: 137.9 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 40.0 KW 30.0 KVAR 50.0 KVA 0.80 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 40.0 KW 30.0 KVAR

==== BUS: QGBT2 DESIGN VOLTS: 440 BUS VOLTS: 424 %VD: 3.69
===== PU BUS VOLTAGE: 0.963 ANGLE: -33.2 DEGREES
LOAD FROM: BUS-0018 C1 FEEDER AMPS: 99.6 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 72.2 KW 11.4 KVAR 73.1 KVA 0.99 LEADING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA
BRANCH DIVERSITY LOAD: 72.2 KW 11.4 KVAR

==== BUS: SE Entrada DESIGN VOLTS: 13800 BUS VOLTS: 13012 %VD: 5.71 $
===== PU BUS VOLTAGE: 0.943 ANGLE: -2.6 DEGREES
*** SWING GENERATOR:CEMIG 560.06 KW -14.06 KVAR
LOAD TO: BUS-0017 CB-Bombas FEEDER AMPS: 8.3 VOLTAGE DROP: 0. %VD: 0.00
PROJECTED POWER FLOW: 185.1 KW 27.4 KVAR 187.1 KVA 0.99 LAGGING
LOSSES THRU FEEDER: 0.0 KW 0.0 KVAR 0.0 KVA

LOAD TO: BUS-0005 TR-Britag TRANSF AMPS: 8.7 VOLTAGE DROP: -668. %VD: -4.84$
PROJECTED POWER FLOW: 194.3 KW -27.2 KVAR 196.2 KVA 0.99 LAGGING
LOSSES THRU FEEDER: 0.8 KW 3.8 KVAR 3.9 KVA
Primary Fixed Tap: -5.000% Sec. Fixed Tap: 0.000%

LOAD TO: BUS-0004 TR-Concen TRANSF AMPS: 8.0 VOLTAGE DROP: -559. %VD: -4.05$
PROJECTED POWER FLOW: 180.7 KW -14.3 KVAR 181.3 KVA 1.00 LAGGING
LOSSES THRU FEEDER: 0.7 KW 3.4 KVAR 3.5 KVA
Primary Fixed Tap: 0.000% Sec. Fixed Tap: 4.545%

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW BUS DATA SUMMARY
*****
BUS NAME BASE VOLT PU VOLT BUS NAME BASE VOLT PU VOLT
Britagem 440. 0.9906 BUS-0004 440. 0.9834
BUS-0005 440. 0.9913 BUS-0009 13800. 0.9429
BUS-0013 13800. 0.9426 BUS-0015 13800. 0.9428
BUS-0016 13800. 0.9426 BUS-0017 13800. 0.9429
BUS-0018 440. 0.9631 BUS-0019 440. 0.9666
BUS-0020 220. 0.9518 ConcentraÁo 440. 0.9815
QF1 440. 0.9666 QGBT1 220. 0.9518
QGBT2 440. 0.9631 SE Entrada 13800. 0.9429

```

BALANCED VOLTAGE DROP AND LOAD FLOW BRANCH DATA SUMMARY

BRANCH NAME	FROM NAME	TO NAME	TYPE	VD%	AMPS	KVA	RATING%
TR-Britag	SE Entrada	BUS-0005	TX2	-4.84	8.70	196.16	41.61
TR-Concen	SE Entrada	BUS-0004	TX2	-4.05	8.04	181.29	38.45
CB-Concen	BUS-0004	ConcentraÁ,,o	FDR	0.19	241.32	180.87	UNKOWN
CB-Britag	BUS-0005	Britagem	FDR	0.08	259.32	195.92	UNKOWN
CB-Bombas	SE Entrada	BUS-0017	FDR	0.00	8.30	187.08	UNKOWN
CB-QGBT2	BUS-0017	BUS-0009	FDR	0.00	3.26	73.36	UNKOWN
TR-QF1	BUS-0016	BUS-0019	TX2	-2.39	3.28	73.96	26.15
TR-QGBT2	BUS-0015	BUS-0018	TX2	-2.03	3.26	73.38	25.94
TR-QGBT1	BUS-0013	BUS-0020	TX2	-0.91	2.25	50.79	47.89
CB-QGBT1	BUS-0016	BUS-0013	FDR	0.00	2.25	50.79	UNKOWN
LT-QGBT2	BUS-0009	BUS-0015	FDR	0.01	3.26	73.36	1.21
XLN-0002	BUS-0017	BUS-0016	FDR	0.02	5.05	113.73	1.87
C1	BUS-0018	QGBT2	FDR	0.00	99.57	73.08	UNKOWN
C3	BUS-0019	QF1	FDR	0.00	100.38	73.94	UNKOWN
C2	BUS-0020	QGBT1	FDR	0.00	137.87	50.00	UNKOWN

*** T O T A L S Y S T E M L O S S E S ***

3. KW 10. KVAR

ANEXO E – RELATÓRIOS DE ANÁLISE DE HARMÔNICOS

11.1 Configuração 1

STUDY CRITERIA

Studies Selected To Run:

Load Flow: Yes
 Frequency Scan: Yes
 Harmonic Distortion: Yes

Load Flow Study Setup Options

Utility Impedance: Yes
 Transformer Phase Shift: Yes
 Solution Method: Exact
 Load Specification: 1st Level Demand or Energy Audit
 Generation Acceleration Factor: 1.00
 Load Acceleration Factor: 1.00
 Bus Voltage Drop: 5.00
 Branch Voltage Drop: 3.00

HI_WAVE Study Setup Options

Fundamental Frequency: 60 Hz
 Max. Harmonic Order: 25
 Include Triplet Harmonics Path (Static Load): No
 Include Triplet Harmonics Path (Ind. Motor): No
 Modify Motor Z by Load Factor (Ind. Motor): Yes
 Modify Load Z by Load Factor (Static Load): Yes

HI_WAVE Study Setup Options for Frequency Scan

Scan Impedance Option: Scan Self Impedance
 Use Positive Sequence Network: Yes
 Use Negative Sequence Network: Yes
 Use Zero Sequence Network: No
 Model Transformer Tap: Yes
 Model Transformer Phase Shift: Yes
 Report Bus Equivalent Impedance: No
 Number of Scan Steps Per Order: 3

HI_WAVE Study Setup Options for Distortion

Use Positive Sequence Network: Yes
 Use Negative Sequence Network: Yes
 Use Zero Sequence Network: Yes
 Model Transformer Tap: Yes
 Model Transformer Phase Shift: Yes
 Fundamental Solution: Use Load Flow Result
 Report Option: All Distortions and Violations
 Current Limits: All Bus As PCC, Based on 1996 Std Current Distortion Limit Table 3.2

LOADS AND MOTORS WITH HARMONIC SOURCE MODELS				
--	--	--	--	--

Bus Name	Voltage	Component Name	LF Current	Harmonic Library
Britagem	440	BRIT_Inv	14.9	Inversor 6 Pulsos
ConcentraTPO	440	CONC_Inv	212.0	Inversor 6 Pulsos

HARMONIC SOURCE		
Inversor 6 Pulsos		
Order	Magnitude (%)	Angle (Degrees)
1	100.000	0.00
5	32.000	0.00
7	9.500	0.00
11	6.500	0.00
13	3.500	0.00
17	2.500	0.00
19	2.000	0.00
23	1.500	0.00
25	1.000	0.00

PASSIVE FILTER DATA												
Filter Name	Bus Name	Bus Voltage	Rated Voltage	Connect	Filter Type	Capacitor KVAR	Tuned Order	Q	M	R (Ω)	L (H)	C (μ F)
BC-Bomba1	QGBT2	440	440	WYE_G	Capacitor	36.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	493.2488 493.2488
BC-Britagem 1	Britagem	440	440	WYE_G	Capacitor	100.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	1370.100 1370.100
BC-Britagem 2	Britagem	440	440	WYE_G	Capacitor	65.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	890.5881 890.5881
BC-ConcentraTpo	ConcentraTpo	440	440	WYE_G	Capacitor	260.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	3562.399 3562.399
BC-QF1	QF1	440	440	WYE_G	Capacitor	65.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	890.5881 890.5881

UTILITY, GENERATOR AND MOTOR DATA							
Component Name	Component Type	Bus Name	Bus Voltage	Base Voltage	Base KVA	R1 R2 R0	X1 X2 X0
CEMIG	UTILITY	SE Entrada	13800	13800	100000	12.9883 12.9883 35.3579	7.4943 7.4943 18.9908

TOTAL VOLTAGE DISTORTION					
Bus Name	Voltage	V_RMS(V)	V_TIF	V_THD(%)	IEEE-519
Britagem	440	439.23	31.3341	8.0017>	5.0
BUS-0004	440	445.72	25.1503	8.8542>	5.0
BUS-0005	440	439.63	30.4202	7.8490>	5.0
BUS-0009	13800	13155.36	14.9258	5.3074>	5.0
BUS-0013	13800	13152.26	14.9963	5.3230>	5.0
BUS-0015	13800	13154.28	14.9406	5.3104>	5.0
BUS-0016	13800	13152.26	14.9963	5.3230>	5.0
BUS-0017	13800	13155.50	14.9249	5.3072>	5.0
BUS-0018	440	428.58	17.6978	5.6820>	5.0
BUS-0019	440	430.35	27.6570	6.4480>	5.0
BUS-0020	220	211.76	14.8249	5.2632>	5.0
ConcentraTpo	440	445.58	26.4918	9.1781>	5.0
QF1	440	430.35	27.6570	6.4480>	5.0
QGBT1	220	211.76	14.8249	5.2632>	5.0
QGBT2	440	428.58	17.6978	5.6820>	5.0
SE Entrada	13800	13155.85	14.9218	5.3065>	5.0

TOTAL CURRENT DISTORTION									
Deicve Name	Bus Name From/To	Voltage From/To	I_RMS(A)	kWLoss Tot/Harm	kVARLoss Tot/Harm	IT	K	I_THD(%)	IEEE-519
BC-Britagem 1	Britagem	440 440	143.18	0.000 0.000	-102.534 -3.520	27211.07	6.78	45.01	
BC-Britagem 2	Britagem	440 440	93.07	0.000 0.000	-66.649 -2.288	17687.66	6.78	45.01	
BC-ConcentraTπo	ConcentraTπo	440 440	379.66	0.000 0.000	-275.684 -11.270	81269.88	5.93	46.66	
BC-QF1	QF1	440 440	88.21	0.000 0.000	-63.297 -1.375	20617.87	4.90	35.03	
BC-Bomba1	QGBT2	440 440	47.92	-0.000 0.000	-34.617 -0.571	6049.28	3.36	29.73	
CEMIG	SE Entrada	13800 13800	25.56	2.036 2.036	5.970 5.970	1345.58	2.05	20.94	
CB-Concen	BUS-0004 ConcentraTπo	440 440	342.78	0.787 0.088	0.738 0.252	34863.98	3.45	31.34>	5.0
CB-Britag	BUS-0005 Britagem	440 440	260.22	0.196 0.019	0.271 0.080	34367.14	3.44	26.18>	8.0
LT-QGBT2	BUS-0009 BUS-0015	13800 13800	3.23	0.005 0.000	-0.152 0.000	152.74	1.17	7.03	12.0
TR-QGBT1	BUS-0013 BUS-0020	13800 220	2.23	0.272 0.000	0.924 0.001	8.88	1.01	1.54	15.0
TR-QGBT2	BUS-0015 BUS-0018	13800 440	3.23	0.177 0.001	0.751 0.021	152.33	1.17	6.97	12.0
CB-QGBT1	BUS-0016 BUS-0013	13800 13800	2.23	0.000 0.000	0.000 0.000	8.88	1.01	1.54	15.0
TR-QF1	BUS-0016 BUS-0019	13800 440	3.34	0.190 0.009	0.968 0.219	610.88	2.86	21.72>	12.0
CB-QGBT2	BUS-0017 BUS-0009	13800 13800	3.23	0.001 0.000	0.000 0.000	152.74	1.17	7.03	12.0
XLN-0002	BUS-0017 BUS-0016	13800 13800	5.04	0.026 0.000	-0.287 0.003	607.64	1.77	13.62>	12.0
C1	BUS-0018 QGBT2	440 440	98.71	0.000 0.000	0.000 0.000	4658.31	1.17	6.97	8.0
C3	BUS-0019 QF1	440 440	102.09	0.000 0.000	0.000 0.000	18680.46	2.86	21.72>	8.0
C2	BUS-0020 QGBT1	220 220	136.52	0.000 0.000	0.000 0.000	543.17	1.01	1.54	8.0
TR-Concen	SE Entrada BUS-0004	13800 440	11.43	1.502 0.152	9.927 3.590	1162.13	3.45	31.34>	5.0
TR-Britag	SE Entrada BUS-0005	13800 440	8.73	0.818 0.056	5.093 1.514	1153.44	3.44	26.18>	5.0
CB-Bombas	SE Entrada BUS-0017	13800 13800	8.26	0.005 0.000	0.002 0.000	661.19	1.45	10.93>	5.0

TOTAL SYSTEM POWER LOSSES			
Harmonic Losses		Total RMS Losses	
P(kW)	Q(kVAR)	P(kW)	Q(kVAR)
3.05	-4.72	6.71	-515.92

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: Britagem (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	437.830	-34.49		
5	29.812	-178.05	6.809	> 3.000
7	18.395	20.85	4.201	> 3.000
11	0.506	-163.94	0.116	3.000
13	0.027	21.68	0.006	3.000
17	0.044	-173.66	0.010	3.000
19	0.030	70.48	0.007	3.000
23	0.019	-159.02	0.004	3.000
25	0.000	0.00	0.000	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 439.23 V_THD(%): 8.00 > IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: ConcentraTpo (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	443.716	-34.85		
5	40.290	-164.74	9.080	> 3.000
7	5.385	151.61	1.214	3.000
11	2.258	-168.72	0.509	3.000
13	0.868	77.37	0.196	3.000
17	0.447	-148.80	0.101	3.000
19	0.312	98.32	0.070	3.000
23	0.188	-127.40	0.042	3.000
25	0.114	119.76	0.026	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 445.58 V_THD(%): 9.18 > IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: QF1 (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	429.456	-34.00		
5	25.747	-178.21	5.995	> 3.000
7	9.518	25.73	2.216	3.000
11	3.615	20.09	0.842	3.000
13	0.513	-106.37	0.120	3.000
17	0.038	28.39	0.009	3.000
19	0.023	-84.16	0.005	3.000
23	0.000	0.00	0.000	3.000
25	0.000	0.00	0.000	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 430.35 V_THD(%): 6.45 > IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: QGBT1 (220V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	211.470	-34.06		
5	10.711	-177.93	5.065	> 3.000
7	3.021	26.72	1.429	3.000
11	0.091	47.77	0.043	3.000
13	0.090	68.83	0.042	3.000
17	0.026	-153.40	0.012	3.000
19	0.022	94.42	0.011	3.000
23	0.016	-131.34	0.007	3.000
25	0.010	115.68	0.005	3.000
Voltage: 220.0 V_RMS: 211.76 V_THD(%): 5.26 > IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: QGBT2 (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	427.894	-33.95		
5	23.152	-177.84	5.411	> 3.000
7	7.378	26.53	1.724	3.000
11	0.295	57.19	0.069	3.000
13	0.719	65.51	0.168	3.000
17	0.183	31.09	0.043	3.000
19	0.074	-83.17	0.017	3.000
23	0.023	50.03	0.005	3.000
25	0.000	0.00	0.000	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 428.58 V_THD(%): 5.68 > IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: SE Entrada (13800V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	13137.370	-3.40		
5	671.155	152.41	5.109	> 3.000
7	188.375	57.02	1.434	3.000
11	4.457	29.20	0.034	3.000
13	5.965	98.97	0.045	3.000
17	1.655	176.64	0.013	3.000
19	1.436	124.45	0.011	3.000
23	0.997	-161.31	0.008	3.000
25	0.627	145.71	0.005	3.000
Voltage: 13800.0 V_RMS: 13155.85 V_THD(%): 5.31 > IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC CURRENT SPECTRUM REPORT				
Device Name: CB-Concen				
From: BUS-0004 (440V)				
To: ConcentраТπo (440V)				
Point of Common Coupling (PCC): (Isc/Ilf = 17.732)				
Harmonic Order	Harmonic Amperes	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	327.095	10.08		
5	95.486	-55.91	29.192	> 4.000
7	36.867	-85.56	11.271	> 4.000
11	5.360	-74.08	1.639	2.000
13	1.292	171.59	0.395	2.000
17	0.577	-56.71	0.176	1.500
19	0.348	-169.64	0.106	1.500
23	0.168	-35.36	0.051	0.600
25	0.094	-148.20	0.029	0.600
Voltage: 440.0 I_RMS: 342.78 I_THD(%): 31.34 >				
kWLoss: 0.787 kVARLoss: 0.738				
I_K: 3.45 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC CURRENT SPECTRUM REPORT				
Device Name: CB-Britag				
From: BUS-0005 (440V)				
To: Britagem (440V)				
Point of Common Coupling (PCC): (Isc/Ilf = 23.039)				
Harmonic Order	Harmonic Amperes	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	251.740	-40.24		
5	42.398	-86.25	16.842	> 7.000
7	50.422	110.04	20.029	> 7.000
11	1.651	-62.82	0.656	3.500
13	0.409	-13.24	0.163	3.500
17	0.036	165.38	0.014	2.500
19	0.037	36.58	0.015	2.500
23	0.024	167.14	0.010	1.000
25	0.014	54.28	0.006	1.000
Voltage: 440.0 I_RMS: 260.22 I_THD(%): 26.18 >				
kWLoss: 0.196 kVARLoss: 0.271				
I_K: 3.44 IEEE-519 LIMIT (THD%): 8.0				

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-Britagem 1 (Capacitor)									
Bus Name: Britagem (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			130.56540			99.01342			437.82983
5			44.45097			2.29525			29.81182
7			38.39837			1.22339			18.39467
11			1.66023			0.00146			0.50612
13			0.10583			0.00001			0.02730
17			0.22432			0.00002			0.04425
19			0.17172			0.00001			0.03031
23			0.12913						0.01883
25			0.08672						0.01163
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 100.00				
V_RMS: 439.229		V_CREST: 486.675		I_RMS: 143.180		KVA: 102.534			
V_RMS: 99.8248%		V_CREST: 110.6079%		I_RMS: 109.1178%		KVA: 102.5336%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-ConcentraTpo (Capacitor)									
Bus Name: ConcentraTpo (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			344.04757			264.41401			443.71625
5			156.20102			10.90047			40.29032
7			29.23020			0.27265			5.38543
11			19.25659			0.07530			2.25774
13			8.75404			0.01317			0.86846
17			5.89393			0.00456			0.44714
19			4.59866			0.00249			0.31215
23			3.35367			0.00109			0.18805
25			2.21646			0.00044			0.11434
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 260.00				
V_RMS: 445.581		V_CREST: 493.580		I_RMS: 379.660		KVA: 275.684			
V_RMS: 101.2685%		V_CREST: 112.1772%		I_RMS: 111.2844%		KVA: 106.0324%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-QF1 (Capacitor)									
Bus Name: QF1 (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			83.24654			61.92209			429.45612
5			24.95407			1.11282			25.74684
7			12.91449			0.21290			9.51769
11			7.70819			0.04826			3.61503
13			1.29341			0.00115			0.51327
17			0.12663			0.00001			0.03843
19			0.08545						0.02320
23			0.04202						0.00942
25			0.02319						0.00479
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 65.00				
V_RMS: 430.348		V_CREST: 468.925		I_RMS: 88.208		KVA: 63.297			
V_RMS: 97.8064%		V_CREST: 106.5738%		I_RMS: 103.4204%		KVA: 97.3804%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-Bomba1 (Capacitor)									
Bus Name: QGBT2 (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			45.93803			34.04622			427.89366
5			12.42807			0.49838			23.15246
7			5.54460			0.07085			7.37795
11			0.34890			0.00018			0.29544
13			1.00288			0.00125			0.71857
17			0.33485			0.00011			0.18347
19			0.15117			0.00002			0.07411
23			0.05655						0.02290
25			0.02932						0.01092
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 36.00				
V_RMS: 428.584		V_CREST: 459.729		I_RMS: 47.925		KVA: 34.617			
V_RMS: 97.4054%		V_CREST: 104.4840%		I_RMS: 101.4541%		KVA: 96.1584%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

F I L T E R S P E C T R U M R E P O R T

Filter Name: BC-Britagem 2 (Capacitor)
 Bus Name: Britagem (440V)

Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			84.86972			64.36041			437.82988
5			28.89388			1.49195			29.81182
7			24.95959			0.79522			18.39467
11			1.07918			0.00095			0.50612
13			0.06879						0.02730
17			0.14581			0.00001			0.04425
19			0.11162			0.00001			0.03031
23			0.08394						0.01883
25			0.05637						0.01163

Capacitor Rated Voltage: 440.00	Rated 3 Phase KVA: 65.00		
V_RMS: 439.229	V_CREST: 486.675	I_RMS: 93.069	KVA: 66.649
V_RMS: 99.8248%	V_CREST: 110.6079%	I_RMS: 109.1207%	KVA: 102.5362%
Limit: 110.0%	Limit: 169.7%	Limit: 135.0%	Limit: 135.0%

11.2 Configuração 2

STUDY CRITERIA

Studies Selected To Run:

Load Flow: Yes
 Frequency Scan: Yes
 Harmonic Distortion: Yes

Load Flow Study Setup Options

Utility Impedance: Yes
 Transformer Phase Shift: Yes
 Solution Method: Exact
 Load Specification: 1st Level Demand or Energy Audit
 Generation Acceleration Factor: 1.00
 Load Acceleration Factor: 1.00
 Bus Voltage Drop: 5.00
 Branch Voltage Drop: 3.00

HI_WAVE Study Setup Options

Fundamental Frequency: 60 Hz
 Max. Harmonic Order: 25
 Include Triplet Harmonics Path (Static Load): No
 Include Triplet Harmonics Path (Ind. Motor): No
 Modify Motor Z by Load Factor (Ind. Motor): Yes
 Modify Load Z by Load Factor (Static Load): Yes

HI_WAVE Study Setup Options for Frequency Scan

Scan Impedance Option: Scan Self Impedance
 Use Positive Sequence Network: Yes
 Use Negative Sequence Network: Yes
 Use Zero Sequence Network: No
 Model Transformer Tap: Yes
 Model Transformer Phase Shift: Yes
 Report Bus Equivalent Impedance: No
 Number of Scan Steps Per Order: 3

HI_WAVE Study Setup Options for Distortion

Use Positive Sequence Network: Yes
 Use Negative Sequence Network: Yes
 Use Zero Sequence Network: Yes
 Model Transformer Tap: Yes
 Model Transformer Phase Shift: Yes
 Fundamental Solution: Use Load Flow Result
 Report Option: All Distortions and Violations
 Current Limits: All Bus As PCC, Based on 1996 Std Current Distortion Limit Table 3.2

LOADS AND MOTORS WITH HARMONIC SOURCE MODELS				
Bus Name	Voltage	Component Name	LF Current	Harmonic Library
Britagem	440	BRIT_Inv	15.0	Inversor 6 Pulsos
ConcentraTPO	440	CONC_Inv	218.0	Inversor 6 Pulsos

HARMONIC SOURCE		
Inversor 6 Pulsos		
Order	Magnitude (%)	Angle (Degrees)
1	100.000	0.00
5	32.000	0.00
7	9.500	0.00
11	6.500	0.00
13	3.500	0.00
17	2.500	0.00
19	2.000	0.00
23	1.500	0.00
25	1.000	0.00

PASSIVE FILTER DATA												
Filter Name	Bus Name	Bus Voltage	Rated Voltage	Connect	Filter Type	Capacitor KVAR	Tuned Order	Q	M	R (Ω)	L (H)	C (μ F)
BC-Bomba1	QGBT2	440	440	WYE_G	Capacitor	36.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	493.2488 493.2488
BC-Britagem 1	Britagem	440	440	WYE	SingleTuned	200.0	4	20		0.0138 0.0138	0.0002 0.0002	2740.300 2740.300
BC-ConcentraTpo	ConcentraTpo	440	440	WYE	SingleTuned	100.0	5	20		0.0202 0.0202	0.0002 0.0002	1370.100 1370.100
BC-QF1	QF1	440	440	WYE_G	Capacitor	65.0				0.0000 0.0000	0.0000 0.0000	890.5881 890.5881

UTILITY, GENERATOR AND MOTOR DATA							
Component Name	Component Type	Bus Name	Bus Voltage	Base Voltage	Base KVA	R1 R2 R0	X1 X2 X0
CEMIG	UTILITY	SE Entrada	13800	13800	100000	12.9883 12.9883 35.3579	7.4943 7.4943 18.9908

TOTAL VOLTAGE DISTORTION					
Bus Name	Voltage	V_RMS(V)	V_TIF	V_THD(%)	IEEE-519
Britagem	440	435.73	14.3224	0.6537	5.0
BUS-0004	440	432.51	77.1306	2.2827	5.0
BUS-0005	440	436.07	14.3738	0.6599	5.0
BUS-0009	13800	13008.32	15.5936	0.7990	5.0
BUS-0013	13800	13005.05	15.2121	0.7993	5.0
BUS-0015	13800	13007.20	15.5239	0.8004	5.0
BUS-0016	13800	13005.05	15.2121	0.7993	5.0
BUS-0017	13800	13008.46	15.5979	0.7989	5.0
BUS-0018	440	423.65	37.1409	1.3093	5.0
BUS-0019	440	425.24	38.8399	1.8497	5.0
BUS-0020	220	209.33	15.0282	0.7902	5.0
ConcentraTpo	440	431.67	81.7501	2.4047	5.0
QF1	440	425.24	38.8399	1.8497	5.0
QGBT1	220	209.33	15.0282	0.7902	5.0
QGBT2	440	423.65	37.1410	1.3093	5.0
SE Entrada	13800	13008.83	15.6138	0.7989	5.0

TOTAL CURRENT DISTORTION									
Deicve Name	Bus Name From/To	Voltage From/To	I_RMS(A)	kWLoss Tot/Harm	kVARLoss Tot/Harm	IT	K	I_THD(%)	IEEE-519
BC-Britagem 1	Britagem	440 440	283.04	3.324 0.001	-213.521 0.023	3403.11	1.01	1.85	
BC-ConcentraTπo	ConcentraTπo	440 440	147.22	1.311 0.216	-100.047 0.498	21577.11	5.23	44.46	
BC-QF1	QF1	440 440	83.85	-0.000 0.000	-60.895 -0.205	37778.31	5.14	18.76	
BC-Bomba1	QGBT2	440 440	45.98	-0.000 0.000	-33.430 -0.061	24679.63	4.98	14.84	
CEMIG	SE Entrada	13800 13800	24.84	0.027 0.027	0.101 0.101	551.89	1.03	2.44	
CB-Concen	BUS-0004 ConcentraTπo	440 440	241.11	0.381 0.004	0.279 0.016	44339.79	1.66	8.31	12.0
CB-Britag	BUS-0005 Britagem	440 440	259.39	0.188 0.000	0.202 0.000	3018.12	1.01	1.27	12.0
LT-QGBT2	BUS-0009 BUS-0015	13800 13800	3.26	0.006 0.000	-0.149 0.000	754.19	1.73	6.08	20.0
TR-QGBT1	BUS-0013 BUS-0020	13800 220	2.25	0.277 0.000	0.942 0.000	3.65	1.00	0.18	20.0
TR-QGBT2	BUS-0015 BUS-0018	13800 440	3.26	0.181 0.001	0.785 0.038	754.63	1.73	6.08	20.0
CB-QGBT1	BUS-0016 BUS-0013	13800 13800	2.25	0.000 0.000	0.000 0.000	3.65	1.00	0.18	20.0
TR-QF1	BUS-0016 BUS-0019	13800 440	3.32	0.187 0.004	0.930 0.171	1167.07	3.49	14.26	20.0
CB-QGBT2	BUS-0017 BUS-0009	13800 13800	3.26	0.001 0.000	0.000 0.000	754.19	1.73	6.08	20.0
XLN-0002	BUS-0017 BUS-0016	13800 13800	5.07	0.027 0.000	-0.281 0.002	1168.35	2.07	9.25	20.0
C1	BUS-0018 QGBT2	440 440	99.79	0.000 0.000	0.000 0.000	23076.30	1.73	6.08	12.0
C3	BUS-0019 QF1	440 440	101.41	0.000 0.000	0.000 0.000	35688.36	3.49	14.26	12.0
C2	BUS-0020 QGBT1	220 220	137.91	0.000 0.000	0.000 0.000	223.43	1.00	0.18	12.0
TR-Concen	SE Entrada BUS-0004	13800 440	8.04	0.734 0.006	3.649 0.230	1477.99	1.66	8.31	20.0
TR-Britag	SE Entrada BUS-0005	13800 440	8.71	0.809 0.000	3.803 0.004	101.29	1.01	1.27	20.0
CB-Bombas	SE Entrada BUS-0017	13800 13800	8.32	0.005 0.000	0.002 0.000	1204.82	1.41	5.68	20.0

TOTAL SYSTEM POWER LOSSES			
Harmonic Losses		Total RMS Losses	
P(kW)	Q(kVAR)	P(kW)	Q(kVAR)
0.30	0.84	7.50	-397.61

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: Britagem (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	435.716	-33.77		
5	1.529	-33.03	0.351	3.000
7	2.024	-132.48	0.464	3.000
11	0.224	-36.95	0.051	3.000
13	0.927	-103.55	0.213	3.000
17	0.433	36.73	0.099	3.000
19	0.467	-72.73	0.107	3.000
23	0.484	65.67	0.111	3.000
25	0.361	-45.40	0.083	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 435.73 V_THD(%): 0.65 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: ConcentraТпо (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	431.543	-33.77		
5	3.949	-34.20	0.915	3.000
7	5.439	-124.48	1.260	3.000
11	4.436	17.96	1.028	3.000
13	3.739	-93.33	0.866	3.000
17	3.097	47.69	0.718	3.000
19	2.867	-62.87	0.664	3.000
23	2.683	75.91	0.622	3.000
25	1.960	-34.72	0.454	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 431.67 V_THD(%): 2.40 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: QF1 (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	425.163	-33.19		
5	1.979	-41.04	0.465	3.000
7	4.013	-134.40	0.944	3.000
11	5.823	-156.86	1.370	3.000
13	2.785	82.29	0.655	3.000
17	0.279	-134.15	0.066	3.000
19	0.230	115.83	0.054	3.000
23	0.148	-105.58	0.035	3.000
25	0.090	143.66	0.021	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 425.24 V_THD(%): 1.85 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: QGBT1 (220V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	209.327	-33.25		
5	0.823	-40.76	0.393	3.000
7	1.274	-133.41	0.608	3.000
11	0.146	-129.18	0.070	3.000
13	0.488	-102.51	0.233	3.000
17	0.186	44.06	0.089	3.000
19	0.221	-65.60	0.106	3.000
23	0.243	73.36	0.116	3.000
25	0.185	-37.28	0.088	3.000
Voltage: 220.0 V_RMS: 209.33 V_THD(%): 0.79 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: QGBT2 (440V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	423.618	-33.13		
5	1.779	-40.67	0.420	3.000
7	3.111	-133.60	0.734	3.000
11	0.476	-119.75	0.112	3.000
13	3.899	-105.83	0.920	3.000
17	1.334	-131.45	0.315	3.000
19	0.734	116.82	0.173	3.000
23	0.359	-105.26	0.085	3.000
25	0.206	143.88	0.049	3.000
Voltage: 440.0 V_RMS: 423.65 V_THD(%): 1.31 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC VOLTAGE SPECTRUM REPORT				
Bus: SE Entrada (13800V)				
Harmonic Order	Harmonic Voltages	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	13008.413	-2.57		
5	51.580	-70.42	0.397	3.000
7	79.423	-103.11	0.611	3.000
11	7.180	-147.74	0.055	3.000
13	32.370	-72.37	0.249	3.000
17	12.037	14.10	0.093	3.000
19	14.227	-35.56	0.109	3.000
23	15.615	43.39	0.120	3.000
25	11.830	-7.26	0.091	3.000
Voltage: 13800.0 V_RMS: 13008.83 V_THD(%): 0.80 IEEE-519 LIMIT (THD%): 5.0				

HARMONIC CURRENT SPECTRUM REPORT				
Device Name: CB-Concen				
From: BUS-0004 (440V)				
To: Concentratio (440V)				
Point of Common Coupling (PCC): (Isc/Ilf = 55.685)				
Harmonic Order	Harmonic Amperes	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	240.281	-29.40		
5	11.214	64.31	4.667	10.000
7	10.164	-23.65	4.230	10.000
11	10.472	112.01	4.358	4.500
13	5.148	2.04	2.143	4.500
17	3.964	139.66	1.650	4.000
19	3.148	29.01	1.310	4.000
23	2.351	167.71	0.979	1.500
25	1.566	57.05	0.652	1.500
Voltage: 440.0 I_RMS: 241.11 I_THD(%): 8.31				
kWLoss: 0.381 kVARLoss: 0.279				
I_K: 1.66 IEEE-519 LIMIT (THD%): 12.0				

HARMONIC CURRENT SPECTRUM REPORT				
Device Name: CB-Britag				
From: BUS-0005 (440V)				
To: Britagem (440V)				
Point of Common Coupling (PCC): (Isc/Ilf = 51.767)				
Harmonic Order	Harmonic Amperes	Phase Angle	Distortion Percent	IEEE-519 Limit
1	259.372	-24.65		
5	1.695	-169.70	0.653	10.000
7	2.671	137.32	1.030	10.000
11	0.798	106.77	0.308	4.500
13	0.360	175.94	0.139	4.500
17	0.105	70.07	0.040	4.000
19	0.092	-78.11	0.035	4.000
23	0.100	39.74	0.039	1.500
25	0.076	-74.32	0.029	1.500
Voltage: 440.0 I_RMS: 259.39 I_THD(%): 1.27				
kWLoss: 0.188 kVARLoss: 0.202				
I_K: 1.01 IEEE-519 LIMIT (THD%): 12.0				

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-Britagem 1 (SingleTuned)									
Bus Name: Britagem (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1	282.99286	282.99286	282.99286	3.32248	19.02053	232.56425	6.77840	38.80489	474.46793
5	4.35464	4.35464	4.35464	0.00079	0.02252	0.01101	0.10430	2.98561	1.46020
7	2.80773	2.80773	2.80773	0.00033	0.01311	0.00327	0.06725	2.69503	0.67249
11	0.16523	0.16523	0.16523		0.00007	0.00001	0.00396	0.24923	0.02518
13	0.56053	0.56053	0.56053	0.00001	0.00097	0.00007	0.01343	0.99920	0.07229
17	0.19403	0.19403	0.19403		0.00015	0.00001	0.00465	0.45231	0.01914
19	0.18550	0.18550	0.18550		0.00016	0.00001	0.00444	0.48329	0.01637
23	0.15697	0.15697	0.15697		0.00013		0.00376	0.49506	0.01144
25	0.10734	0.10734	0.10734		0.00007		0.00257	0.36798	0.00720
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 200.00				
V_RMS: 474.471		V_CREST: 476.752		I_RMS: 283.041		KVA: 232.579			
V_RMS: 107.8342%		V_CREST: 108.3528%		I_RMS: 107.8531%		KVA: 116.2893%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-ConcentraTπo (SingleTuned)									
Bus Name: ConcentraTπo (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1	134.52441	134.52441	134.52441	1.09488	4.56415	105.10904	4.69897	19.58834	451.10574
5	58.77844	58.77844	58.77844	0.20903	4.35676	4.01332	2.05315	42.79418	39.42079
7	10.04676	10.04676	10.04676	0.00611	0.17820	0.08375	0.35094	10.24048	4.81288
11	3.41935	3.41935	3.41935	0.00071	0.03244	0.00617	0.11944	5.47687	1.04238
13	2.28602	2.28602	2.28602	0.00032	0.01713	0.00233	0.07985	4.32733	0.58968
17	1.35919	1.35919	1.35919	0.00011	0.00792	0.00063	0.04748	3.36453	0.26811
19	1.10678	1.10678	1.10678	0.00007	0.00587	0.00037	0.03866	3.06203	0.19534
23	0.83767	0.83767	0.83767	0.00004	0.00407	0.00018	0.02926	2.80542	0.12213
25	0.55913	0.55913	0.55913	0.00002	0.00197	0.00007	0.01953	2.03540	0.07500
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 100.00				
V_RMS: 452.852		V_CREST: 497.632		I_RMS: 147.220		KVA: 109.216			
V_RMS: 102.9210%		V_CREST: 113.0982%		I_RMS: 112.1965%		KVA: 109.2159%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-QF1 (Capacitor)									
Bus Name: QF1 (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			82.41440			60.69033			425.16329
5			1.91779			0.00657			1.97872
7			5.44504			0.03785			4.01287
11			12.41695			0.12524			5.82338
13			7.01847			0.03386			2.78517
17			0.92076			0.00045			0.27942
19			0.84657			0.00034			0.22986
23			0.65781			0.00017			0.14754
25			0.43781			0.00007			0.09034
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 65.00				
V_RMS: 425.236		V_CREST: 440.511		I_RMS: 83.852		KVA: 60.895			
V_RMS: 96.6445%		V_CREST: 100.1160%		I_RMS: 98.3131%		KVA: 93.6844%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			

FILTER SPECTRUM REPORT									
Filter Name: BC-Bomba1 (Capacitor)									
Bus Name: QGBT2 (440V)									
Harmonic Order	IR (Amp)	IL (Amp)	IC (Amp)	R (kW)	L (kVAR)	C (kVAR)	R (V)	L (V)	C (V)
1			45.47905			33.36928			423.61845
5			0.95513			0.00294			1.77933
7			2.33773			0.01260			3.11071
11			0.56203			0.00046			0.47592
13			5.44195			0.03675			3.89920
17			2.43479			0.00563			1.33406
19			1.49777			0.00190			0.73427
23			0.88535			0.00055			0.35855
25			0.55348			0.00020			0.20622
Capacitor Rated Voltage: 440.00					Rated 3 Phase KVA: 36.00				
V_RMS: 423.655		V_CREST: 435.517		I_RMS: 45.977		KVA: 33.430			
V_RMS: 96.2852%		V_CREST: 98.9811%		I_RMS: 97.3317%		KVA: 92.8620%			
Limit: 110.0%		Limit: 169.7%		Limit: 135.0%		Limit: 135.0%			