



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PECE
Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

**A IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DE ENERGIA NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DOS EMPREENDIMENTOS – ESTUDO DE CASO DE
UM DATA CENTER**

Allay Aurora Nierotka Magalhães

São Paulo

2017

Allay Aurora Nierotka Magalhães

**A IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DE ENERGIA NA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DOS EMPREENDIMENTOS – ESTUDO DE CASO DE
UM DATA CENTER**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Especialização em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência Energética.

ORIENTADOR: Prof. MSc. Eduardo S. Yamada

São Paulo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que tem feito por mim até o presente momento, por todas as oportunidades e os desafios vencidos na vida, pela família e pelos amigos próximos a mim, sei que nada acontece sem sua permissão.

Ao meu noivo, que se comporta de maneira exemplar frente às adversidades, por todas as coisas que pude aprender ao seu lado, sempre com tanto amor e carinho em tudo que faz.

Aos professores e orientador pela paciência e competência na forma com que conduzem as disciplinas, compartilhando suas experiências e conhecimentos adquiridos.

Ao engenheiro Jorge Luis Gennari, pelo apoio e disponibilização de material para finalização do trabalho.

“Ser o homem mais rico do cemitério não me interessa. Ir para a cama à noite dizendo que fizemos algo maravilhoso, isso importa para mim.”

Steve Jobs

RESUMO

O objetivo desta monografia é alertar sobre os impactos que a baixa qualidade do sistema elétrico pode proporcionar para a eficiência energética dos empreendimentos.

Com o acúmulo de novas tecnologias digitais e o avanço da energia descentralizada, a qualidade do sistema elétrico vem se tornando numa grande preocupação durante a fase de uso e operação dos empreendimentos se tornando vital não só para a eficiência energética, mas principalmente, para a confiabilidade do sistema elétrico e o adequado funcionamento e operação dos sistemas e equipamentos.

Neste trabalho demonstraremos que a qualidade do sistema elétrico deve se tornar numa premissa técnica de estudo devido ao acúmulo cada vez maior de equipamentos eletrônicos e digitais, além de outros como, por exemplo, lâmpadas leds, ar condicionado, bombas hidráulicas, que são grandes fontes de problemas nos sistemas elétricos, com geração de harmônicas, cargas reativas, etc.

Este fenômeno vem sendo cada vez mais comum e tem causado, cada vez mais, queimas de equipamentos eletrônicos e em outros casos, grande geração de perdas nos motores intensificando ainda mais a perda de qualidade do sistema elétrico dos empreendimentos.

Devido a não consideração desse efeito no dimensionamento dos equipamentos, perde-se a eficiência dos equipamentos, descaracterizando assim o foco do desenvolvimento conforme especificado no projeto inicial.

A ideia deste trabalho é propor algumas alternativas para minimizar esse impacto e casos reais que demonstram a existência desses problemas e as soluções propostas para reduzir e até eliminá-los.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Distorções harmônicas. Qualidade de energia.

ABSTRACT

The objective of this monograph is to alert about the impacts that the energy efficiency to the low quality of the electrical system can provide behind the energy efficiency network and in the ventures.

With the accumulation of new digital technologies and the advance of decentralized energy, the quality of the electrical system in energy efficiency has become a major concern during the phase of use and operation of the developments becoming vital not only for energy efficiency, for the reliability of the electrical system and the proper functioning and operation of systems and equipment, the success of a good enterprise.

In this work we will demonstrate that the focus on energy efficiency and the quality of the electric system should be based on a technical premise of study to take as a premise the quality, due to the increasing accumulation of electronic and digital equipment, among other equipment such as, for example , chiller, leds, air conditioners, hydraulic pumps, which are great sources of problems in electrical systems, such as generation of harmonics, reactive loads, etc. it causes a stress in the network, causing the distortion of unwanted harmonics.

This phenomenon has been increasingly common and has caused, more and more, in the burning of electronic equipment and in other cases or in case of, great generation of losses in the engines further intensifying the loss of quality of the electrical system of the motor enterprises increase due to increased losses in iron and copper.

Due to the lack of consideration of this effect in the equipment design, the equipment efficiency is lost, thus de-characterizing the development focus as specified in the initial design.

The idea of this project is to propose some alternatives to minimize this impact and real case that demonstrate the existence of these problems and the proposed solutions to reduce and even eliminate them.

KEYWORDS: Energy Efficiency. Harmonic Distortions. Power quality.

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

Hz – é a unidade de medida para frequência

DNAE - Departamento Nacional de Águas e Energia

CNAEE - Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

EPRI - Electric Power Research Institute – Instituto de Pesquisa de Potência Elétrica

THD - Distorções Harmônicas totais

THDV - Distorções Harmônicas de Tensão

THDI - Distorções Harmônicas de Corrente

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

C.A - Corrente alternada

C.C - Corrente continua

kW - Potência ativa

kVAr - Potência reativa

pu - por unidade

SAIFI - System Average Interruption Frequency Index - Índice médio de frequência de interrupção do sistema

SAIDI - System Average Interruption Duration Index - Índice médio de duração de interrupção do sistema

UPS - Fonte de alimentação ininterrupta

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

DNAE - Departamento Nacional de Águas e Energia

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

CNAEE - Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica

EPRI - Electric Power Research Institute

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Rede elétrica	14
Figura 2.1: Tolerâncias típicas de tensão	20
Figura 2.2: Inversor de frequência	25
Figura 2.3: Medições de harmônicas	28
Figura 2.4: Triângulo de potências	29
Figura 2.5: Causa dos transitórios	31
Figura 2.6: Transitório oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores	33
Figura 3.1: Motor utilizando energia ativa e reativa do transformador	34
Figura 4.1: Alimentação circuito	40
Figura 4.2: Diagrama QGBT	42
Figura 4.3: Circuito UPS	42
Figura 4.4: THDV's - Cenário 2	50
Figura 4.5: Espectro de tensão - Cenário 2	51
Figura 4.6: Forma de onda de tensão - Cenário 2	52
Figura 4.7: Evolução dos THDVs por cenário e por barra	53
Figura 4.8: Filtro de derivação	55
Figura 5.1: THDVs Cenário com Filtro	57
Figura 5.2: Espectro de Tensão - Cenário 2	59
Figura 5.3: Forma de Onda Cenário 2	60
Figura A.1: THDV'S Cenário 1	70
Figura A.2 : Espectro de Tensão - Cenário 1	71
Figura A.3 : Forma de Onda - Cenário 1	72
Figura A.4 : THDV'S - Cenário 3	73
Figura A.5 : Espectro de tensão - Cenário 3	74
Figura A.6 : Forma de Onda de Tensão - Cenário 3	75
Figura A.7 : THDV'S - Cenário 4	76
Figura A.8 : Espectro de tensão - Cenário 4	77
Figura A.9 : Forma de onda de tensão - Cenário 4	78
Figura A.10 : THDV'S - Cenário 5	79
Figura A.11 : Espectro de tensão - Cenário 5	80
Figura A.12 : Forma de onda de tensão - Cenário 5	81
Figura A.13: THDV'S - Cenário 6	82
Figura A.14: Espectro de tensão - Cenário 6	84
Figura A.15 - Forma de Onda - Cenário 6	85
Figura A.16: THDV'S - Cenário 7	86
Figura A.17: Espectro de tensão - Cenário 7	88
Figura A.18: Forma de onda de tensão - Cenário 7	89
Figura A.19: THDV's Cenário 8	90
Figura A.20: Espectro de tensão - Cenário 8	91
Figura A.21: Forma de onda de tensão - Cenário 8	93
Figura A.22: THDV's Cenário 9	95
Figura A.23: Espectro de tensão - Cenário 9	96
Figura A.24: Forma de onda de tensão - Cenário 9	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Máxima distorção de corrente harmônica em percentual de corrente IL.	37
Tabela 3.2: Resumo distúrbios.....	39
Tabela 4.1: Valores de corrente (A) das harmônicas individuais para cada painel	44
Tabela 4.2: Medições iniciais.....	46
Tabela 4.3 – Simulações.....	47
Tabela 4.4: Resumo dos Cenários	47
Tabela 4.5: Cenário 2	49
Tabela 5.1 Resumo investimento inicial	61
Tabela 5.2: Perdas Harmônicas.....	61
Tabela 5.3: Payback descontado.....	62
Tabela A.1: Especificação Filtro.....	68
Tabela A.2 : Cenário 1	69
Tabela A.3 - Cenário 3.....	72
Tabela A.4 : Cenário 4	76
Tabela A.5 : Cenário 5.....	79
Tabela A.6 - Cenário 6.....	82
Tabela A.7: Cenário 7	86
Tabela A.8: Cenário 8.....	90
Tabela A.9: Cenário 9	94

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1: Fórmula do Fator de Potência	29
Equação 4.1: Função harmônica	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa	14
1.1.1	Os problemas e impactos da baixa qualidade de energia nos empreendimentos 15	
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	Metodologia	17
2	ESTADO DA ARTE	18
2.1	Cargas Geradoras De Harmônicas	22
2.1.1	Motores elétricos	23
2.1.2	Equipamentos e dispositivos de chaveamento.....	24
2.1.3	Sistemas de proteção	26
2.1.4	Equipamentos de geração de arco.....	27
2.2	Fator de Potência	28
2.3	Transitórios.....	30
2.3.1	Transitórios Impulsivos	31
2.3.2	Transitórios Oscilatórios	32
3	SOLUÇÕES TÉCNICAS	34
3.1	Correção de Fator de Potência	34
3.2	Soluções Para Atenuar Harmônicas	36
3.2.1	Filtros de harmônicas.....	36
3.3	Resumo.....	39
4	ESTUDO DE CASO	40
4.1	Apresentação	40
4.2	Implementação do estudo de harmônicas.....	41
	Cenário 2	49
4.3	Resultados.....	53
5	AValiação DA Viabilidade Técnica E EconôMica	57
5.1	Análise de viabilidade técnica	57
5.2	Análise da viabilidade econômica.....	60

6	CONCLUSÃO.....	63
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	65
	Apêndices	68
	APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS FILTROS DO CENÁRIO 2	68
	APÊNDICE B – CENÁRIOS	69
	Cenário 1	69
	Cenário 5	78
	Cenário 7	86
	Cenário 8	90

1 INTRODUÇÃO

“Nos últimos anos, o assunto qualidade de energia elétrica vem ganhando cada vez mais importância, face às várias mudanças em curso no setor elétrico” (SOUZA, 2004).

Qualidade de Energia pode ser definida como a melhor maneira da energia elétrica em alimentar equipamentos ou dispositivos que consomem energia elétrica, nos quesitos de frequência de nível de tensão, para que os equipamentos operem de maneira pretendida, sem perda de desempenho ou vida útil. O termo qualidade de energia é usado para que seja dimensionada de forma correta a alimentação de uma carga. Na ausência da qualidade de energia os equipamentos podem danificar facilmente ou em alguns casos nem funcionar.

A definição de alimentar traz também a característica de como é feita a alimentação desta carga como, por exemplo, o número de interrupções ou variações de energia, as quais podem acarretar na perda por descontinuidade no serviço, ocasionando desde perda de receita pela parada dos equipamentos, até a queima dos periféricos.

Este assunto está cada vez mais em pauta visto a maior sensibilidade das instalações considerando equipamentos suscetíveis aos efeitos dos distúrbios.

A qualidade de energia está intrinsecamente ligada a eficiência energética. Não está apenas ligada a um padrão de fornecimento de energia a uma Indústria por exemplo, mas também aos distúrbios nos sinais responsáveis pela distribuição desta energia.

Com o acúmulo de novas tecnologias com foco na eficiência, alguns efeitos colaterais apareceram e trouxeram novos desafios para se garantir a qualidade de energia em todos os ramos.

O conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de cuidados necessários no setor elétrico. Desde o correto dimensionamento dos equipamentos até a questão da gestão de distribuição das cargas.

1.1 Justificativa

De uma maneira geral, cada “efeito” deve ser analisado de forma pontual e conforme ilustrado um atual circuito de transmissão e distribuição na figura 1.1, devido à alta complexidade de um sistema elétrico, em muitos casos não existe uma única receita a ser seguida, tendo que ser analisado caso a caso cada problema e impacto da resolução do mesmo. Em muitos casos a segregação de cargas pode ser uma alternativa no trato deste impacto, em outros a inserção de filtro ativo para controle da distorção.



Figura 1.1: Rede elétrica
Fonte: Adaptado ANEEL

Resumindo cada empreendimento é responsável pelo correto dimensionamento dos equipamentos para assegurar a eficiência energética, não esquecendo dos efeitos colaterais que podem trazer para o próprio empreendimento ou para a rede, impactando assim em outros empreendimentos.

1.1.1 Os problemas e impactos da baixa qualidade de energia nos empreendimentos

Um dos focos de qualidade de energia são os prejuízos que a inserção das Harmônicas no sistema. As harmônicas têm um impacto considerável, quando se trata do quesito qualidade de energia em empreendimentos, o aumento das despesas com o custo da energia, o envelhecimento precoce dos materiais e as perdas de produtividade, conforme levantado nos pontos técnicos dos parágrafos abaixo resumem os maiores problemas.

De forma antagônica, o foco atual na melhora na eficiência energética levou ao uso intenso de eletrônica de potência aumentando assim a quantidade de harmônicos na rede elétrica. Um dos exemplos é o uso de fontes chaveadas, que substituíram as antigas fontes lineares e trouxeram um aumento grande de harmônicos na rede elétrica, como efeito colateral, de um remédio para melhora no rendimento dos aparelhos. Atualmente, os equipamentos utilizam mais componentes eletrônicos e, trazendo sensibilidade as variações da rede elétrica.

As distribuidoras de energia são responsáveis por entregar e gerir um sistema satisfatório dentro dos parâmetros de qualidade definidos pela ANEEL. Isto quer dizer deve entregar e garantir que dentro do sistema elétrico apenas circule um produto com qualidades mínimas exigidas pela PRODIST, ou seja a forma de onda, a amplitude ou distorção bem como a continuidade do fornecimento do serviço deve ser considerada de qualidade. A distribuidora é responsável em cobrar de seus clientes que não poluam o sistema com inserção de distorções harmônicas de corrente.

De forma simplificada, a melhor forma de verificar se um sistema está operando dentro das condições normais é checar duas grandezas elétricas. A tensão e a frequência. A frequência em um sistema interligado situa-se na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$. No caso da tensão, três aspectos principais devem ser observados:

1. Forma de onda, a qual deve ser o mais próximo possível de senóide;
2. Simetria do sistema elétrico e;
3. Magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

O termo qualidade da energia elétrica traz diversas definições, por exemplo o conjunto de impactos que atrapalham a amplitude de uma forma de onda da corrente e tensão. Uma definição é a frequência e severidade dos desvios na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Outro exemplo seria o fornecimento impecável da energia, ou seja, sem alteração de amplitude e frequência.

Outro ponto relevante é o impacto na distribuição da energia, um sistema elétrico com alto índice de harmônicos tem como efeito uma baixa eficiência energética e consequentemente baixa qualidade de energia. As harmônicas na rede provocam perda por efeito Joule em transformadores e condutores por exemplo.

Cargas não lineares, geram correntes que podem proporcionar a distorção de onda de tensão, além disso um baixo fator de potência também denota uma baixa qualidade da energia da instalação, bem como outro fator a ser exaltado é a potência reativa que ocupa parte da seção do condutor diminuindo espaço para a transferência da potência ativa. Podemos colocar como exemplos de cargas não lineares conversões de frequência para acionamento de motores, UPS, computadores, partidas suaves entre outras cargas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é através de exemplos demonstrar soluções para os problemas gerados pela falta de qualidade de energia, problemas estes como baixo fator de potência, potência reativas e presença de harmônicas, reduzindo assim a poluição gerada na rede. Poluição esta não restrita apenas a um único ambiente elétrico, como por exemplo, a Indústria. Ultimamente enxergamos em vários ambientes como residenciais, comerciais e geradores de energia.

Finalizando assim com um caso de uso focado no estudo de harmônicas realizado para um Datacenter localizado na cidade de São Paulo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar problemas correlacionados a qualidade de energia;
- Explicar possíveis soluções para problemas relacionados a distúrbios harmônicos;
- Expor necessidade de se obter um bom fator de potência;
- Apresentar um caso real de harmônicas.

1.3 Metodologia

Vários procedimentos metodológicos foram utilizados, dentre os quais podem ser citados:

- Pesquisa Bibliográfica com o objetivo de analisar conceitos, características e tecnologias relacionadas à Qualidade de energia;
- Apresentação de soluções de problemas acerca de nuances técnicas acerca da confiabilidade da rede;
- Apresentação de um Estudo de Caso com demonstração de retorno econômico financeiro;
- Desenvolvimento da monografia a partir de histórico da qualidade de energia.

Devido ao fato de o trabalho estar atrelado a demonstração de novas solução em problemas de conhecimento de todos, as atividades aqui analisadas foram separadas em dois momentos.

No primeiro constam as atividades referentes à realização teórica de soluções para sanar problemas de qualidade de energia e outro trazendo resultados de caso de uso com retorno técnico-econômico do projeto.

2 ESTADO DA ARTE

Ao início da preocupação com a qualidade de energia iniciou-se no Brasil em 1920, com a criação de uma comissão de estudos hidráulicos vinculados ao Ministério da Agricultura, Indústria e comércio.

Com o passar dos anos, surge em 1940, por Decreto Lei nº 6.402, a Divisão de Águas do Departamento Nacional da Produção Mineral. Em alguns anos, a Lei nº 3.782, de 22 de julho de 1960, criou o Ministério de Minas e Energia, alterando a Divisão Águas, em 1965, no Departamento Nacional de Águas e Energia –DNAE e denominando assim a modificação para Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica– DNAEE em dezembro de 1968, pelo Decreto nº 63.951.

O Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica – CNAEE, criado em maio de 1939, tinha como finalidade a supervisão e fiscalização e controle dos serviços de eletricidade, em 1969 foi extinto deixando com DNAEE as suas atribuições iniciais. A Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL com o objetivo regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. Constituída a Agência, com a publicação de seu regimento Interno, ficou assim extinto o DNAEE.

Desde então a maior reclamação quanto a qualidade de fornecimento de energia elétrica era basicamente quanto as interrupções na alimentação dos consumidores.

Sendo um termo indispensável no setor, a qualidade de energia elétrica, possui diversos significados e aplicações dependendo sempre do setor.

No caso das concessionárias de energia, elas têm a qualidade de energia monitorada através de indicadores de continuidade de serviço, denominados como DEC, FEC onde identifica a continuidade por duração e quantidade por unidade consumidora ou por cliente, que os consumidores ficam sem energia, estes índices não denotam ou são caracterizados pelo motivo da interrupção, é um indicador totalmente quantitativo. As metas de DEC e FEC são definidas pela ANEEL de acordo

com região de atuação e o não cumprimento das mesmas pode acarretar em perda da concessão de distribuição naquele ponto.

Qualidade da Energia para os fabricantes de equipamentos tem como definição atender os requisitos necessários para que o produto opere de forma eficiente, de forma a atender as normas aplicáveis e agregando a confiabilidade da rede.

Ao consumidor final o foco é apenas o resultado final, não interessando o como, que ele consiga utilizar de forma contínua e eficiente o produto/serviço.

A preocupação com a qualidade de energia é um tema que tem sido discutido e analisado em todo mundo. Sendo dados da EPRI (Electric Power Research Institute) cerca de 90% das faltas são transitórias em até 2 segundos. A maioria das faltas são muito rápidas em alguns casos imperceptíveis. Entretanto a alteração de corrente mesmo que rápida e quase imperceptível, não passa despercebido aos equipamentos, podendo ocasionar sérios prejuízos como a desprogramação de uma linha montagem acarretando em alto custo para a sua restauração.

O setor elétrico, atualmente, passa diversas transformações. O aumento de dispositivos eletrônicos e a inserção de fontes geradores na rede e o peso das questões ambientais, pressionam a procura por novas tecnologias e cuidados para sanar os problemas que essas novidades trazem para a rede.

A incompatibilidade entre cargas ditas sensíveis e o fornecimento típico de energia por parte das concessionárias traz danos para Computadores, equipamentos eletrônicos, terminais de dados, entre outros já que são particularmente vulneráveis a distúrbios transitórios e ou interrupções de curtíssima duração. A Figura 2.1 ilustra um conjunto de curvas, representando a capacidade de resistência dos computadores, em relação à intensidade e à duração de distúrbios na tensão de alimentação, elaborada pela ITI (Information Technology Institute Council), que desde 1994 substituiu a CBEMA (Computer and Business Equipment Manufacturers Association), associações estas que representam os fabricantes de equipamentos de alta tecnologia.

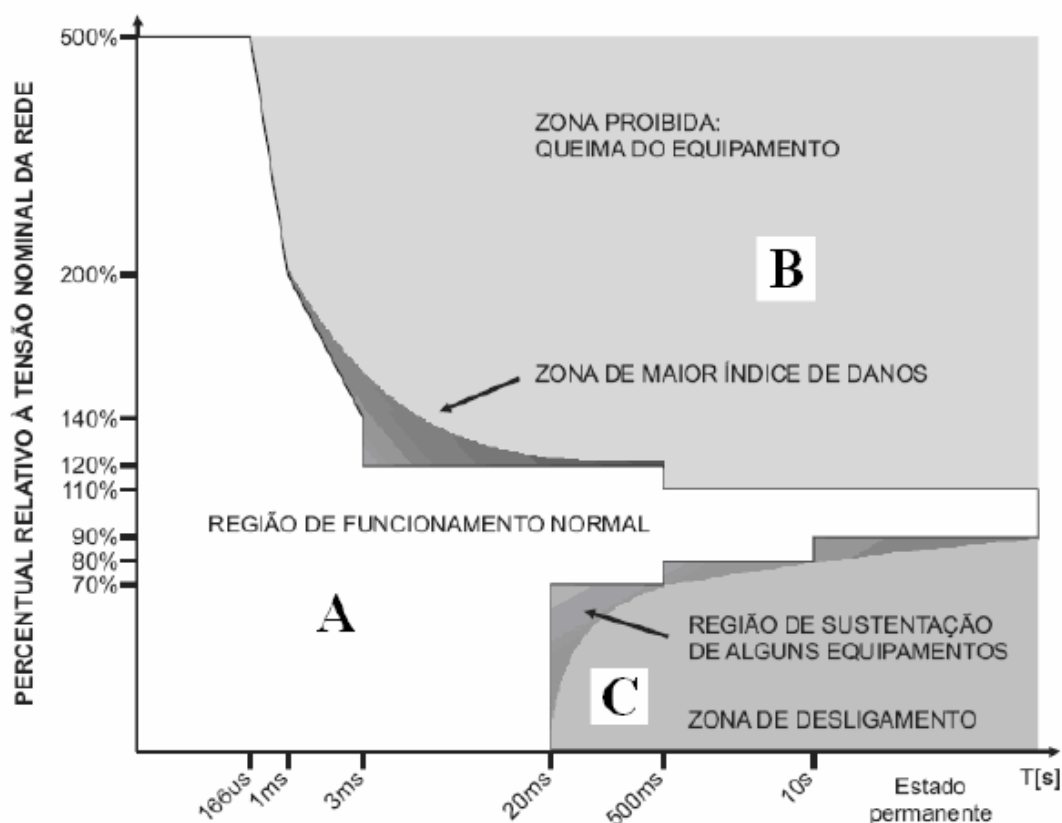


Figura 2.1. Tolerâncias típicas de tensão
Fonte: Fouladgar(2005)

De uns anos para cá a inserção de fontes são utilizadas como filtros para a proteção dessas alterações de carga em períodos transitórios. Na figura acima se pode verificar um espaço entre as duas curvas, onde é representado, através da denominação “A”, os limites de tensão que um computador pode resistir sem danos. Já a área “B”, chamada de zona proibida representa a faixa onde os computadores poderão ter problemas com a variação de tensão. Por último, a região da letra “C”, zona de desligamento, representa os pontos que provavelmente o equipamento parará de funcionar, devido ao afundamento de tensão.

A norma de referência utilizada para definição dos níveis aceitáveis de distorções harmônicas é a IEEE Std. 519-1992 cujo título é “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems” (1992).

Luiz Felipe Willcox de Souza e Ricardo Penido Dutt-Ross do Cepel (2004) publicaram um artigo muito interessante que mostra uma análise bem completa, na qual são feitas medições de duas subestações diferentes. Utilizando-se medidores

diferentes, os resultados são divergentes. O que mostra a necessidade de normatização dos parâmetros de medição e dos protocolos de comunicação.

Talvez o efeito mais visível e nocivo das harmônicas seja a sobrecarga do condutor de neutro. Esse assunto é tratado no artigo de Thomas Flügel (2006). Neste artigo o autor questiona a necessidade real do seccionamento do condutor de neutro na presença de harmônicas, concluindo que as medições podem ser realizadas em intervalos longos. Assim, pode ser planejada até uma parada completa do sistema, descartando a necessidade do seccionamento.

Certamente, o assunto de distorções harmônicas não pode fugir de um modelo matemático. Assim, existem muitas análises matemáticas que envolvem as séries de Fourier e Laplace. Como ser observado na obra de Louis Cuccis (1952) que traz estudos matemáticos de harmônicas e transientes em sistemas de comunicação.

O filtro de harmônicas também é objeto de análise em artigos como o de Keyla Sampaio Câmara (2004) que apresenta primeiramente uma introdução aos conceitos de índices de harmônicas e instalações de filtros. Em seguida, é mostrada a especificação e implementação de um filtro passivo para uma instalação de subestação de uma siderúrgica. O artigo mostra toda a parte de especificação técnica do filtro de acordo com as medições feitas. Seu dimensionamento foi feito levando em consideração que o fator crítico da instalação é a presença do forno a arco. Após a instalação do filtro comprovou-se a diminuição do nível das harmônicas de corrente, minimizando os efeitos no sistema elétrico na concessionária.

Outro assunto também bastante divulgado é o conceito da compatibilidade eletromagnética. A compatibilidade eletromagnética abrange vários tipos de interferência e a possibilidade dos equipamentos de resistir a estas interferências sem prejudicar seu correto funcionamento. Torna-se essencial a análise da compatibilidade eletromagnética nos sistemas atuais que cada vez mais estão sujeitos a interferências externas de diferentes fontes. As distorções harmônicas são consideradas objeto de estudo da compatibilidade eletromagnética conforme a norma IEC 61000-3-2.

Para corrigir problemas de interferência eletromagnética que ocorrem depois que um equipamento foi projetado e está instalado é geralmente muito caro e as adaptações necessárias resultam em atrasos na produção. É preferível seguir uma

boa especificação de compatibilidade eletromagnética durante o projeto e desenvolvimento, antes da sua instalação. (WESTON, 2001).

2.1 Cargas Geradoras De Harmônicas

Harmônica é uma componente senoidal de uma onda periódica que tem uma frequência que é múltipla da frequência fundamental (IEEE, 1992). A distorção propriamente dita ocorre quando são somados estes sinais.

Existem muitos equipamentos que podem ser considerados geradores de perturbações elétricas. Tais equipamentos podem ser denominados como cargas não-lineares. “Uma carga é dita não linear quando a corrente que ela absorve não tem a mesma forma de tensão que a alimenta.” (SCHNEIDER, PROCOBRE, 2003).

Geralmente, cargas que utilizam elementos de eletrônica de potência como tiristores, por exemplo, são não lineares. Outros exemplos são equipamentos industriais (como máquinas de solda e inversores de frequência), equipamentos de escritório (computadores, aparelhos de fax), utensílios domésticos (TV, Micro-ondas) e as lâmpadas fluorescentes.

As cargas não lineares estão divididas em três classes:

- a) Classe 1: Cargas que operam por meio de arco voltaico;
- b) Classe 2: Cargas de núcleo magnético saturado;
- c) Classe 3: Cargas com dispositivo de controle eletrônico.

Como exemplos de cargas de Classe 1 pode-se citar máquinas de solda, fornos a arco e lâmpadas de descarga. Todas estas cargas apresentam uma forma de onda de corrente deformada devido a não linearidade do arco voltaico. Nestes equipamentos, a partir do instante da ignição, a tensão decresce à medida que a corrente do arco aumenta. Em algumas aplicações o comportamento do arco chega a ser aleatório e imprevisível, como nos fornos e nas soldas a arco. No caso das lâmpadas de descarga, os reatores operam como impedância externa limitadora de corrente, de forma que haja a estabilização do arco e conseqüentemente do fluxo luminoso (SCHNEIDER, PROCOBRE, 2003)

As cargas de Classe 2 podem ser, por exemplo: bobinas, reatores e transformadores de núcleo magnético saturado. Tais cargas apresentam correntes deformadas devido a não linearidade dos campos magnéticos. Em equipamentos de núcleo laminado, como transformadores e motores, pode ocorrer o surgimento de correntes harmônicas quando estes são sobreexcitados. Isto devido ao comportamento não linear do aço do núcleo, cujo fluxo magnético gerado passa a não variar proporcionalmente a partir de determinado nível de tensão. Nos motores, as frequências de distorções harmônicas dependem do número de ranhuras da máquina.

Exemplificando as cargas de Classe 3, indica-se: inversores de frequência, micro-ondas, computadores, copiadoras, reatores eletrônicos, retificadores e equipamentos que utilizem semicondutores controlados. Neste tipo de carga a corrente é deformada devido ao chaveamento dos componentes eletrônicos, criando reflexões de ondas na passagem da corrente de um meio condutor para o outro.

2.1.1 Motores elétricos

Os motores deram vigor para o progresso e o adiantamento tecnológico do mundo, alteraram a vida dos indivíduos e as formas de usar a eletricidade em prol de nossas necessidades. Essa grande invenção contribuiu para que o mundo continuasse a se movimentar econômica e socialmente, (STAROSTA, 2006).

Os motores elétricos contêm uma valia de grande expressão na economia mundial, uma vez que esses contribuem com por volta de dez de bilhões de dólares anuais. Sabe-se que mais de 70% da força elétrica consumida na indústria brasileira seja convertida em força mecânica por intermédio de motores elétricos e que 15% da força elétrica industrial sejam acabados com perdas em motores, (LOBOSCO, 1988).

Os motores de indução são os mais comuns, pela maneira de energia fornecida pelas concessionárias. Além do mais, eles são pouco complexos construtivamente que os de corrente contínua. A sua austeridade reduz os custos de construção, fazendo com que eles possam alcançar aos consumidores com um preço baixo. Estes motores se dividem em síncronos e assíncronos.

Motores e geradores são capazes de ser influenciados de maneira significativa por elevadas DHTvs (distorções harmônicas totais de tensão). As distorções de tensão nos terminais das máquinas geram fluxos harmônicos que, por consecutivo, induzem correntes harmônicas no rotor. Esse resultado pode fazer, além da redução do aproveitamento, sobreaquecimento, oscilação e estrépito audível. Porém, o maior resultado é o crescimento das perdas no cobre e no ferro das mesmas, gerando uma elevação de temperatura nas barras do rotor e nos enrolamentos do estator.

Em casos de motores com gaiola de barras profundas, no qual a impedância do rotor amplifica com a frequência, são capazes de acontecer pontos quentes significativos para DHTvs superiores a 10%. Além da elevação de temperatura, as correntes harmônicas são capazes de ser responsáveis por conjugados pulsantes ocasionados pela ação entre as correntes harmônicas e o campo magnético em sua frequência essencial. As amplitudes destes conjugados são mais ou menos proporcionais às correntes harmônicas correspondentes a uma corrente harmônica de capacidade de 10% da corrente necessária gera um conjugado de 10% do seu valor nominal).

2.1.2 Equipamentos e dispositivos de chaveamento

Sob o ponto de ideia da rede C.A de abastecimento, os conversores estáticos controlados (retificadores e inversores) alicerçam uma das fontes mais expressivas de correntes harmônicas. Estes equipamentos são capazes de ser resumidos em 3 grandes categorias:

- Conversores de alta potência, como aqueles usados em transmissão c.c. e na indústria de redução de metais;
- Conversores de média potência, usados para o controle de motores em indústrias e tração ferroviária;
- Conversores de baixa potência (retificadores), alimentando cargas monofásicas, como aparelhos de TV e carregadores de bateria.

Conversores de Alta Potência: Os conversores de alta potência (ordem de MW) são frequentemente equipados com uma indutância de valor bastante alto no lado C.C. Por causa disto, a corrente C.C é razoavelmente considerável e o conversor age como injetor fonte de harmônicos, no lado C.C, ocasionando harmônicos no lado de corrente da corrente alternada.

Conversores de Média Potência: Estes conversores abrangem medida da ordem de dezenas a centenas de kW. Possui uma grande aplicação nas indústrias especialmente para o controle de rapidez de motores de corrente alternada em pontes retificadoras mistas.

Essa forma de conversor vem sendo amplamente adotada em alguns países pelo seu menor esforço (apenas utiliza 3 tiristores). No momento em que operado em plena abundância o conversor acarreta aproximadamente as mesmas correntes harmônicas da ponte completamente controlada.

Entretanto, em abundância rápida, ele não apenas possui um baixo agente de potência, porém introduz distorção harmônica severa na corrente, especialmente nos harmônicos pares. Como conversores e motores são frequentemente dimensionados para reparar futuras expansões, o circuito com baixa abundância pode provocar a frequência harmônica de 2a ordem a graus próximos da corrente essencial.

Inversor de frequência na figura 2.2 apresenta o ajuste básico para os principais blocos que contém, considerando um ponte retificadora trifásica e dois capacitores.

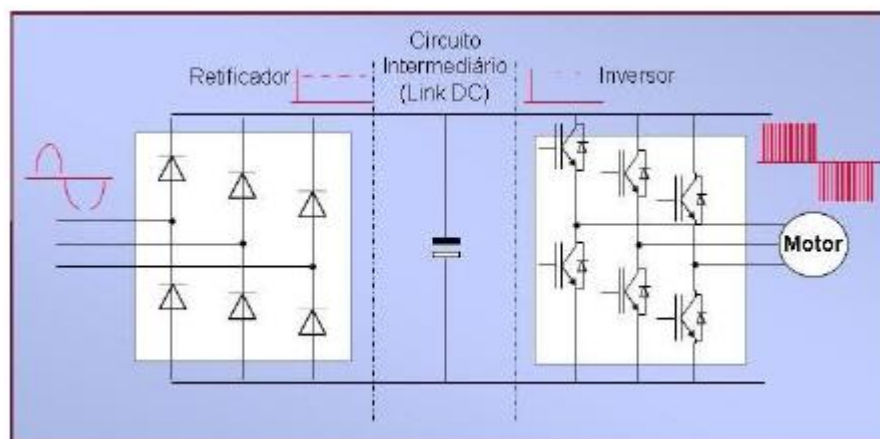


Figura 2.2: Inversor de frequência

Fonte: Adaptado <http://automatecbrasil.comunidades.net/inversores-de-frequencia>.

Considerações Gerais: O conjunto alimentador/conversor apresenta imperfeições comuns, de classe aleatória, que dificultam a avaliação de harmônicos também no ciclo de projeto das instalações de conversores. De entre estas classes aleatórias são capazes de ser citadas:

- As tensões do sistema de abastecimento constantemente apresentam um desbalanceamento ou distorção no formato de onda;
- As impedâncias do transformador-conversor de modo algum são precisamente iguais nas 3 fases;
- Os controles do sistema de ângulo de disparo de tiristores constantemente apresentam diferenças.

2.1.3 Sistemas de proteção

Os relés usados para a proteção do sistema elétrico são capazes de ser influenciados pela figura de harmônicos na rede e fazer um desempenho indevido. Além disso, mais elementos como o tempo de desempenho, corrente de partida e conjugado dos relés são capazes de ser influenciados pela figura de harmônicos. Relés eletromecânicos que dependem da passagem pela corrente zero ou pelo valor pico da onda de preocupação ou corrente no seu desempenho são capazes de acionar indevidamente, uma vez que a corrente harmônica altera a característica fundamental da senoide, podendo fazer mais passagens pela corrente zero e também picos maiores, forçando assim a operação dos equipamentos de forma indevida.

O impacto das harmônicas ocasiona aumento da corrente eficaz provocando um maior aquecimento dos equipamentos internos ao relé, pelos quais passam a corrente, este efeito ocasiona a redução da vida útil e em muitos casos a queima do equipamento.

Felizmente, na maior parte dos casos, atuações indevidas da proteção por causa dos harmônicos apenas ocorrem em sistemas com distorções harmônicas de preocupação surpreendentemente elevadas, com DHTv da ordem de 15%.

2.1.4 Equipamentos de geração de arco

O desempenho dos fornos a arco é eletricamente simples, com uma fonte de força elétrica alimentando eletrodos de grafite, localizados em um pequeno espaço, provocando curtos-circuitos que concentram a energia satisfatória para fundir uma carga metálica. As qualidades operativas básicas de um forno são baixas tensões e altas correntes, que circulam pelos arcos voltaicos e transferem a energia elétrica para a carga metálica (DUGAN, 1997).

As harmônicas produzidas por um forno de arco, utilizado na fabricação de aço, são imprevisíveis acertadas à alteração aleatória do arco.

A corrente do arco é não periódica e sua avaliação revela um espectro constante, inclusive harmônicas de ordem inteira e fracionária. No entanto, medições indicam que harmônicas inteiras entre a 2ª e a 7ª predominam sobre as demais, sendo que sua grandiosidade decai com a ordem. No momento em que o forno age no refino do material, a maneira de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmônicas pares.

No ciclo de fusão, tipicamente, as componentes harmônicas apresentam um valor de até 8% da essencial, enquanto no refino princípios típicos são em redor de 2%. Por causa da alteração da corrente de arco, especialmente no início da fusão, é complicado quantificar os harmônicos existentes no sinal de corrente. A figura 2.3 mostra algumas faixas de princípios médios de harmônicos de corrente, típicos de fornos elétricos a arco.

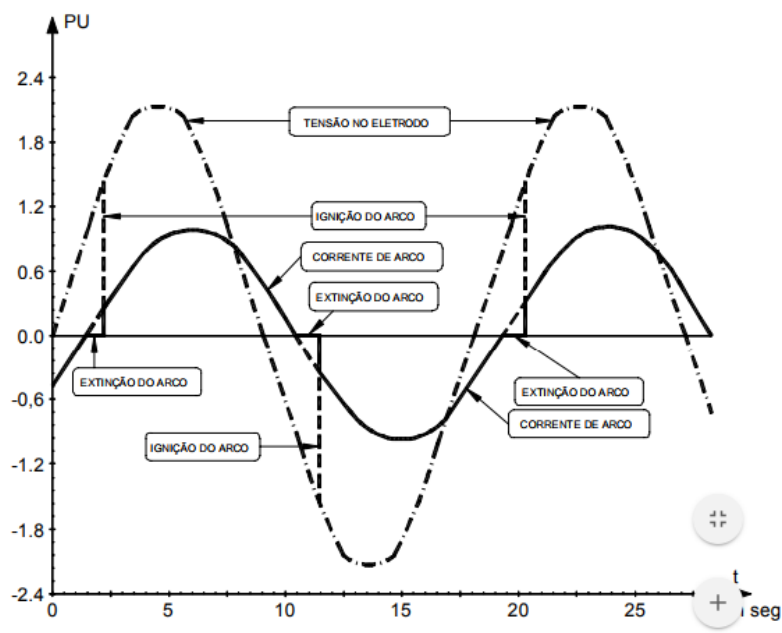


Figura 2.3: Medições de harmônicas
 Fonte: Fonte: <http://www.ess-br.com.br/qualidade-de-energia-eletrica/>

2.2 Fator de Potência

As cargas indutivas necessitam de campo eletromagnético para seu desempenho e por consequência disso sua operação requer dois tipos de potência: ativa e reativa. A potência ativa, indicada em kW, é aquela que realiza trabalho, gerando calor, luz, movimento, etc.

A potência reativa, indicada em kVAR, é usada somente na criação e manutenção dos campos eletromagnéticos das cargas indutivas. Dessa maneira, enquanto a potência ativa é constantemente consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não gerar trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, “ocupando um espaço” no sistema elétrico, o qual poderia ser empregado para proporcionar mais energia ativa.

A potência ativa e a potência reativa, juntas, formam a potência aparente, medida em kVA, que é a potência total gerada e transmitida à carga (MARTINS, 2008). Conhecido por triângulo de potências (Figura 2.4) é utilizado para mostrar, graficamente, a correlação entre as potências ativa, reativa e aparente.

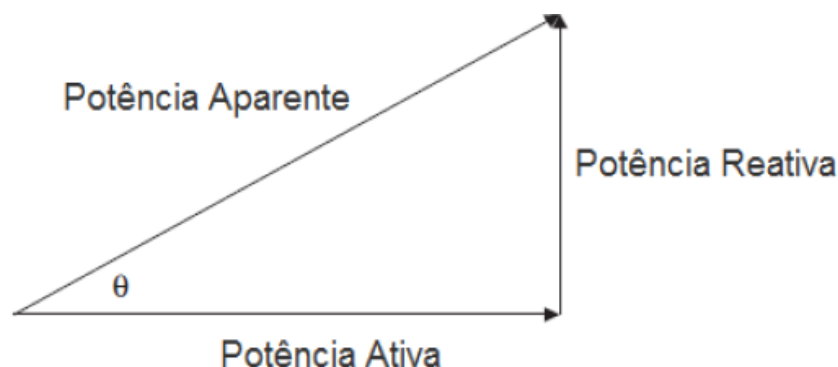


Figura 2.4: Triângulo de potências
Fonte: Do autor

O fator de potência (Fp) pode ser definido como a relação entre o componente ativo da potência e o valor total desta mesma potência (MAMEDE, 2007), ou seja:

$$Fp = \frac{P}{S} = \cos \varphi = \cos \left(\arctg \frac{Q}{P} \right)$$

Equação 2.1: Fórmula do Fator de Potência
Fonte: Do autor

O fator de potência indica a porcentagem da potência total fornecida (kVA) que é efetivamente transformada em potência ativa (kW). Assim o fator de potência mostra o grau de eficiência do uso de um sistema elétrico. Valores altos de fator de potência (próximos de 1,0) indicam uso eficiente da energia elétrica, enquanto que valores baixos evidenciam seu mau aproveitamento, além de representar uma sobrecarga para todo o sistema (DUAILIBE, 2000). Tanto assim que, uma vez constatado um fator de potência de valor inferior a um mínimo prefixado, as concessionárias se vêem na contingência de, em função da legislação em vigor, cobrar uma sobretaxa ou multa. Isto representa, para quem não está com suas instalações adequadas, substancial despesa extra, além de sobrecargas nos transformadores, nos alimentadores, bem como menor rendimento e maior desgaste nas máquinas e equipamentos em geral (TAMIETTI, 2007).

O baixo fator de potência pode provir de diversas causas. A solução para melhoria do fator de potência de uma instalação elétrica passa necessariamente pelo profundo conhecimento e análise dessas causas, a fim de que se possa propor uma ação corretiva mais eficaz (TAMILETTI, 2007). Entre os principais motivos, podemos citar:

- Motores de indução operando em vazio ou superdimensionado (operando com pouca carga);
- Transformadores operando em vazio ou superdimensionados;
- Grande quantidade de motores de pequena potência em operação durante um prolongado tempo;
- Lâmpadas de descarga;
- Cargas especiais com consumo reativo;
- Tensão acima da nominal (CODI, 2004).

O fator de potência característico dos motores de indução pode variar de mais ou menos 0,6, quando em vazio, para mais ou menos 0,93, quando a plena carga. Estes princípios variam de acordo com a potência e categoria do motor, além das condições de carga. Por esse motivo, é comum a utilização de controladores automáticos de fator de potência que atuam conectando e desconectando estágios de bancos de capacitores. O fator de potência é registrado pela Concessionária e, caso o limite seja ultrapassado, o usuário é penalizado na fatura de energia elétrica.

2.3 Transitórios

Fenômenos transitórios ocorrem no sistema elétrico em função de muitas condições.

Muitos transitórios são decorrentes de variações instantâneas na corrente, as quais interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Transitórios pode ser efeito de cargas com operação intermitente, chaveamento de bancos de capacitores falta a terra, operação de dispositivos semicondutores e erros em condutores. Descargas atmosféricas são casos especiais de transitórios, devido aos graus excessivamente altos de energia e rápido tempo

abrangido. A duração de um transitório é pequena, no entanto de grande impacto, uma vez que os equipamentos existentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos: os chamados transitórios impulsivos e os oscilatórios, ocasionados por descargas atmosféricas e por chaveamentos, respectivamente.

Conforme se pode verificar na figura 2.5, a maior parte dos transitórios tem causas naturais.

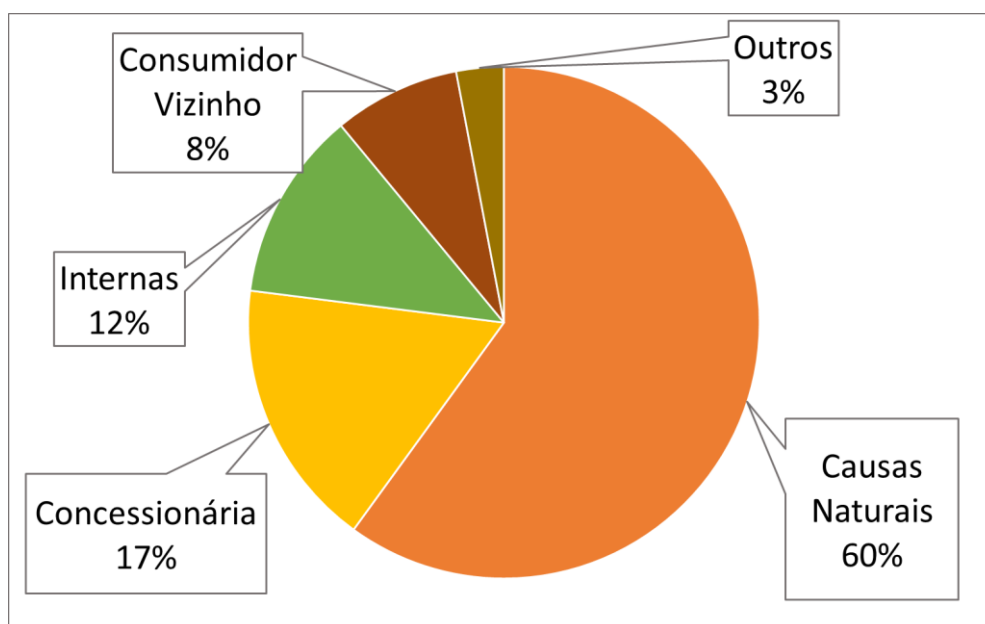


Figura 2.5: Causa dos transitórios
Fonte Engenharia GENNARI, 2016

2.3.1 Transitórios Impulsivos

Como já mencionado, os transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas e sua definição pode ser dada como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (afirmativo ou negativo) e com frequência diferente daquela da rede elétrica. Os transitórios impulsivos usualmente são definidos por um tempo de subida e outro de descida do impulso.

Em sistemas de distribuição, o caminho mais provável para as descargas atmosféricas é por intermédio de um condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobretensões no sistema. Existem numerosos caminhos através dos

quais as correntes de descarga podem penetrar no sistema de aterramento, tais como a terra do primário e secundário dos transformadores e as estruturas do sistema de distribuição. Os principais problemas de Qualidade da Energia ocasionados por tais correntes no sistema de aterramento são:

Elevação do potencial da terra local, em relação a outras terras, em diversos kV.

- Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra podem falhar no momento em que submetidos a altos níveis de tensão, tal como um computador ligado ao telefone por intermédio de um modem.
- Indução de altas tensões nos condutores fase, no momento em que as correntes passam pelos cabos a caminho da terra.

2.3.2 Transitórios Oscilatórios

Esses transitórios são consecutivos de energização de linhas, corte de carga indutiva, extinção de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores. Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são frequentemente localizados em sistemas de sub transmissão e distribuição e são causados por diversos eventos. O mais comum é a energização de bancos de capacitores, o qual frequentemente resulta em oscilações de tensão com frequência entre 300 e 900 Hz,

com magnitude máxima de 2,0 pu, sendo valores típicos de 1,3 a 1,5 pu, com duração entre 0,5 a 3 ciclos, dependendo das características de amortecimento do sistema.

A Figura 2.6 ilustra o resultado da simulação de energização de um banco de capacitores de 600 kVAr na tensão de 13,8kV.

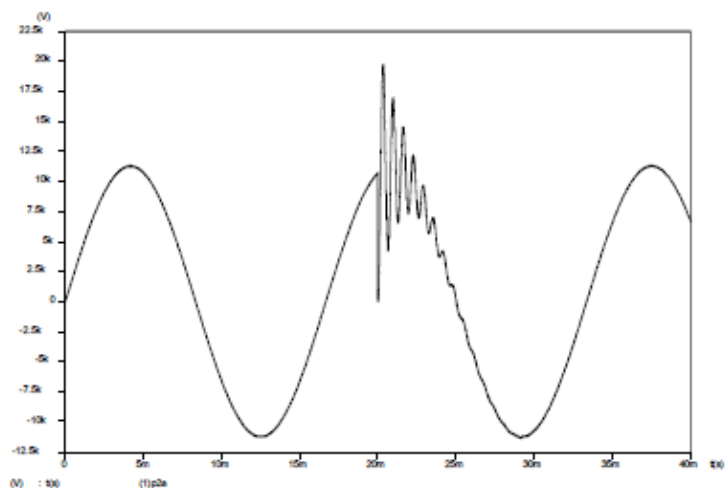


Figura 2.6: Transiente oscilatório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores
Fonte: <http://www.ess-br.com.br/qualidade-de-energia-eletrica/>

3 SOLUÇÕES TÉCNICAS

Dependendo de cada ponto de atenção no quesito qualidade, sempre existirá uma ramificação de soluções. A ideia deste capítulo é exemplificar algumas formas de sanar problemas e melhorar a eficiência com qualidade dos equipamentos.

3.1 Correção de Fator de Potência

No quesito de ajuste de fator de potência a primeira providência para corrigir o baixo fator de potência é a análise das causas que levam à utilização excessiva de energia reativa. A eliminação dessas causas passa pela racionalização do uso de equipamentos – desligar motores em vazio, redimensionar equipamentos superdimensionados, redistribuir cargas pelos diversos circuitos, etc. – e pode, eventualmente, solucionar o problema de excesso de reativo nas instalações (CODI, 2004). Apesar de necessária, a utilização de energia reativa indutiva deve ser limitada ao mínimo possível por não realizar o trabalho efetivo, servindo apenas para magnetizar as bobinas de equipamentos com características indutivas. O excesso de energia reativa exige condutores de maior seção e transformadores de maior capacidade. A esse excesso estão associadas, ainda, perdas por aquecimento e quedas de tensão (SENA, 2005).



Figura 3.1: Motor utilizando energia ativa e reativa do transformador
Fonte: Sena (2005)

Instalando-se capacitores junto às cargas indutivas, a circulação de energia reativa fica limitada a estes equipamentos.

O uso correto de banco de capacitores retém o fator de potência no intervalo de valores estabelecidos pela Concessionária. O capacitor possui a qualidade de corrigir o reativo que é usado pelas cargas indutivas. Outra forma de abordar este fenômeno é utilizar o conceito de troca de armazenamento de energia entre os capacitores e indutores. Como ambas as cargas, indutores e capacitores, estão submetidos à mesma onda de tensão e como o armazenamento de energia do capacitor acontece com um desfasamento de 90 graus elétricos em relação ao armazenamento de energia do indutor, no momento em que um elemento está no ponto de acumulação de energia o outro está devolvendo a energia anteriormente acumulada. Percebe-se que, na verdade, e idealizando os componentes, a soma de energia entre eles é nula. Por isso, a energia reativa não necessita ser criada na usina e enviada pelo sistema elétrico.

Como a utilização de capacitores reduz a corrente eficaz circulando entre a Concessionária e o Consumidor, os condutores conseguem ser de menor bitola, reduzindo os custos do sistema de distribuição. A corrente no transformador é reduzida e isto permite um valor maior de transferência de potência ativa para um mesmo valor de potência aparente do transformador. Também, tem-se a redução das perdas por efeito Joule tanto nos condutores como nos enrolamentos dos transformadores, uma vez que há uma redução no valor eficaz da corrente.

Para a aplicação de capacitores no qual há circulação de correntes harmônicas, uma maneira de atenuar a perda de vida útil do banco é sobre dimensionar a sua tensão nominal. Isto é, usar um capacitor de 440 volts de valor nominal em uma instalação elétrica cuja tensão nominal é 380 volts. Nesse caso, a potência reativa nominal do capacitor não será mais produzida uma vez que a tensão sobre o mesmo não é a nominal.

Se houver condição de ressonância entre o banco de capacitores e a indutância do sistema elétrico em uma frequência harmônica existente na instalação, será preciso o uso de um filtro de dissintonia em série com os capacitores do banco. Outra saída seria o uso de filtro passivo com a intenção de filtrar as harmônicas e corrigir o reativo da instalação. Neste caso, o dielétrico dos capacitores precisa ter qualidades especiais, uma vez que os harmônicos de correntes serão drenados para

dentro do filtro. A vantagem do uso do filtro é o confinamento dos harmônicos no interior da instalação atenuando a injeção de harmônicos para a Concessionária.

Outra maneira de correção do fator de potência é por intermédio de motores síncronos e o controle da corrente de excitação de campo do mesmo. Este princípio não costuma ser utilizado por causa do preço do motor síncrono. O método poderia ser economicamente possível se além de corrigir o fator de potência, essa máquina fosse usada para o acionamento de cargas mecânicas.

3.2 Soluções Para Atenuar Harmônicas

Pode-se atenuar o efeito das harmonias de diversas maneiras para assegurar uma solução eficaz nos empreendimentos. Para isso, devem-se seguir etapas de diagnóstico, iniciando com as medições das perturbações em corrente e em tensão simples aos níveis de receptores poluidores, saídas perturbadas e fontes de alimentação. Após isso, tem-se condições na definição de um padrão sobre o programa dos fenômenos, permitindo uma explicação precisa de suas causas e uma determinação otimizada das soluções possíveis, uma relação de diagnóstico completa é proposta colocando em evidência, os níveis de perturbações atuais, os níveis de perturbação máximo admissível (IEC 61000), uma garantia de performance sobre as soluções onde é proposta a implementação dos materiais.

As etapas acima asseguram o correto diagnóstico para termos correto dimensionamento da melhor solução em minimizar os impactos das harmônicas.

3.2.1 Filtros de harmônicas

Filtro é um termo genérico usado para descrever os equipamentos cujo propósito é reduzir a corrente ou tensão harmônica que flui por um sistema. (IEEE, 1992). Segundo esta definição, um filtro deve ser capaz de reduzir os níveis de distorção harmônica para valores aceitáveis perante a norma vigente IEEE 519.

De modo análogo os valores aceitáveis de distorção harmônica de corrente são expressos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Máxima distorção de corrente harmônica em percentual de corrente IL.
Fonte IEEE, 1992.

Ordem individual de harmônica						
Isc/IL	<11	11<=h<17	17<=h<23	22<=h<35	35<=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
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
Mesmo a harmônica limitada a 25% de ordem limite acima						
A corrente de distorção harmônica resulta em corrente continua offset, converter metade da onda não é permitido.						
*Toda a potência gerada pelo equipamento é limitada para estes valores de distorção de corrente independente da atual Isc/IL. Onde: Isc= máxima corrente de curto circuito até Pcc. IL=máxima demanda de carga de corrente (componente fundamental de frequência) até Pcc. Pcc= Potencia de corrente de curto circuito						

3.2.1.1 Filtro passivo

Filtros passivos são na verdade associações de capacitores, indutores e resistores de potência, sendo amplamente utilizados nas instalações industriais. Estão divididos em filtros de sintonia simples (single-tuned) e filtros passa-alta (high-pass). Os primeiros são formados pela associação de um indutor em série com capacitores, sendo projetados para possuírem baixas impedâncias na frequência sintonizada.

Esta frequência de sintonia é que determinará qual ordem harmônica o filtro irá mitigar. Filtros passa-alta são formados pela associação em série de capacitores com um conjunto de resistor e indutor. (BRAGA, 2009) A grande desvantagem dos filtros passivos é a impossibilidade de correção com alterações de cargas. Ou seja, uma vez instalado o filtro, qualquer mudança na instalação que interfira nas distorções harmônicas pode provocar a perda de sintonia do mesmo, sendo necessário um novo dimensionamento. Os elementos passivos trabalham muito próximos de suas tolerâncias, não deixando margem para alterações. (DAS, 2002).

3.2.1.2 Filtro ativo

Os Filtros Ativos são muito mais complexos que os filtros passivos. Formulados como conversores estáticos que injetam corrente nos barramentos à serem compensados. A corrente injetada tem o objetivo de cancelar algebricamente as correntes harmônicas que as cargas não lineares produzem. Estes filtros podem ter três tipos de instalação: Série, paralelo ou híbrido (BRAGA, 2009).

Filtros ativos ligados em paralelo (também chamados de Shunt) atuam como fontes de corrente controladas, utilizando semicondutores para o chaveamento, se adaptam às necessidades de corrente da instalação. Uma vantagem importante é a garantia de continuidade de fornecimento no caso de algum defeito no filtro. Filtros ativos ligados em série atuam como uma impedância variável, gerando altas impedâncias para as correntes harmônicas bloqueando-as. Diferente dos filtros paralelos, este tipo de filtro vai impedir o fornecimento de energia no caso de um defeito, devido à sua ligação em série com a carga. Associando-se filtros ativos e passivos são formados filtros híbridos. Utilizando ambas as configurações para eliminar diferentes faixas de frequências harmônicas.

3.3 Resumo

Na tabela 3.2, um resumo de algumas causas e efeitos dos itens foi levantado conforme citado nos pilares da qualidade de energia na PRODIST, que são presença de harmônicas, fator de potencia e transitórios. É fácil perceber que os efeitos são em muitos casos iguais, portanto uma análise critica para a descoberta das causas é essencial para a definição de uma solução coerente com o problema apresentado.

Tabela 3.2: Resumo distúrbios
Fonte: Do autor

Distúrbio	Descrição	Causas	Efeitos	Soluções
HARMÔNICOS	Alteração do padrão normal de tensão (onda senoidal), causada por frequencias múltiplas da fundamental (50Hz-60Hz)	UPS, Reatores eletrônicas, inversores de frequência, retificadores e outras cargas não lineares	Sobreaquecimento de cabos e equipamentos Diminuição da performance de motores . Queima de placas eletrônicas, danificação de materiais	Filtro de harmônicas Reatores de linha Melhorias na fiação e no aterramento Transformadores de isolação
Fator de Potência	O FP é a medida da eficiência de uma instalação elétrica.	Motores de indução operando em vazio ou com baixa carga; Transformadores operando em vazio ou com baixa carga	Sub-utilização da capacidade instalada, pois uma parte, a energia reativa, não pode ser utilizada para gerar trabalho produtivo.	Instalando-se capacitores junto às cargas indutivas Utilizando máquinas síncronas super-excitadas
Transitórios	Distúrbio na curva senoidal resultando em rápido e agudo aumento de tensão	Descargas atmosféricas Manobras da concessionárias Manobras de grandes cargas e bancos de capacitores	Erro de processamento Queima de placas eletrônicas, danificação de materiais	UPS com supressores Transformadores de isolação

4 ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a aplicação real na minimização dos efeitos das distorções harmônicas será apresentado um caso real com o estudo prático para adequação da melhor solução na diminuição destes efeitos.

4.1 Apresentação

A instalação escolhida foi de um Data Center da cidade de São Paulo, o qual possui uma área de cinco mil m², com potência instalada de 4,5MVA onde após a queima de vários equipamentos, foi requerida o serviço de consultoria para sanar os problemas até então desconhecidos.

Este datacenter possui sistema híbrido, onde a entrada da concessionária é em média tensão 34,5kV o qual como pode ser visto no diagrama da figura 4.1, com a possibilidade de trabalhar independentemente da alimentação da concessionária, através de quatro geradores (G1, G2, G3 e G4). Logo após os painéis de medição da concessionária, foram instalados 2 transformadores abaixadores para média tensão nominados como TMB e TMA.

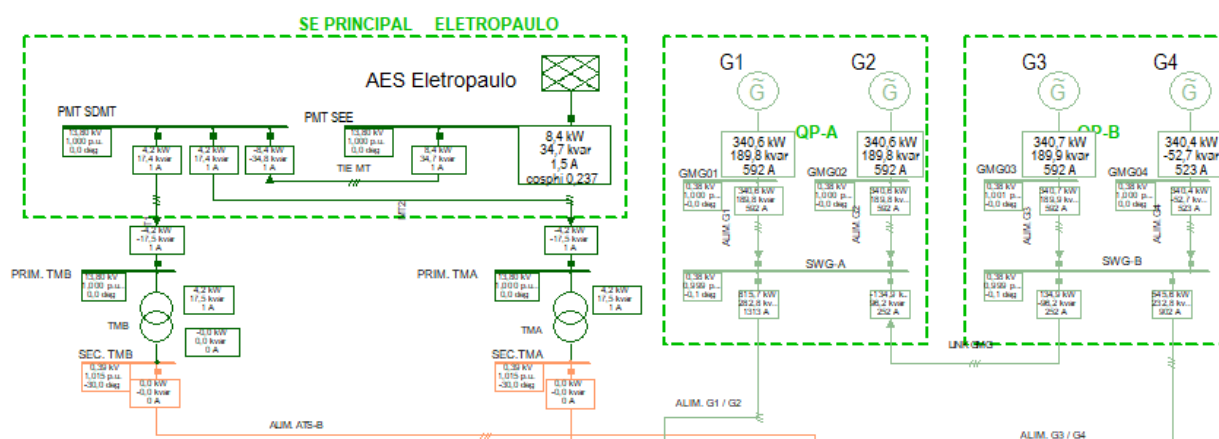


Figura 4.1: Alimentação circuito
Fonte: GENNARI, 2016

Devido ao fato deste ambiente estar cercado de cargas não lineares, visto que é um Data Center, acumulando-se a inclusão de transformador e cargas geradoras, neste momento já se suspeitava que o problema de queima de periféricos dar-se-ia a distúrbios harmônicos.

O estudo de caso foi realizado com a colaboração da Empresa MANTEST de responsabilidade do Eng. Jorge Luis Gennari.

Todo o sistema elétrico foi modelado com o auxílio do software “Power Factory” específico para cálculos elétricos. Desta forma, todos os componentes foram representados detalhadamente para a precisão necessária dos resultados.

Devido ao efeito “skin” e às variações internas da indutância em relação à frequência, o sistema elétrico é modelado levando-se em conta estas variações.

Isto pode ser feito através da associação dos elementos do sistema elétrico à equação 4.1:

$$z(f) = (1 - a) + a \left(\frac{f_h}{f_1} \right)^b$$

Equação 4.1: Função harmônica
Fonte: Do autor

Na qual os coeficientes a e b são escolhidos de acordo com o tipo de componente do sistema.

4.2 Implementação do estudo de harmônicas

Nos sistemas elétricos do datacenter pode-se perceber que as tensões e correntes do sistema desviam-se da forma senoidal devido à presença no sistema elétrico de equipamentos com circuitos eletromagnéticos que podem saturar, como transformadores, ou devido a presença de equipamentos controlados por tiristores, como drives AC/DC, UPS's, inversores de frequência, etc., algo totalmente comum para este tipo de aplicação.

Como pode ser visto na figura 4.1 após a saída do transformador o circuito é interligado em painéis de baixa tensão, responsáveis este pela proteção das UPS, conforme ilustrado na figura 4.2.

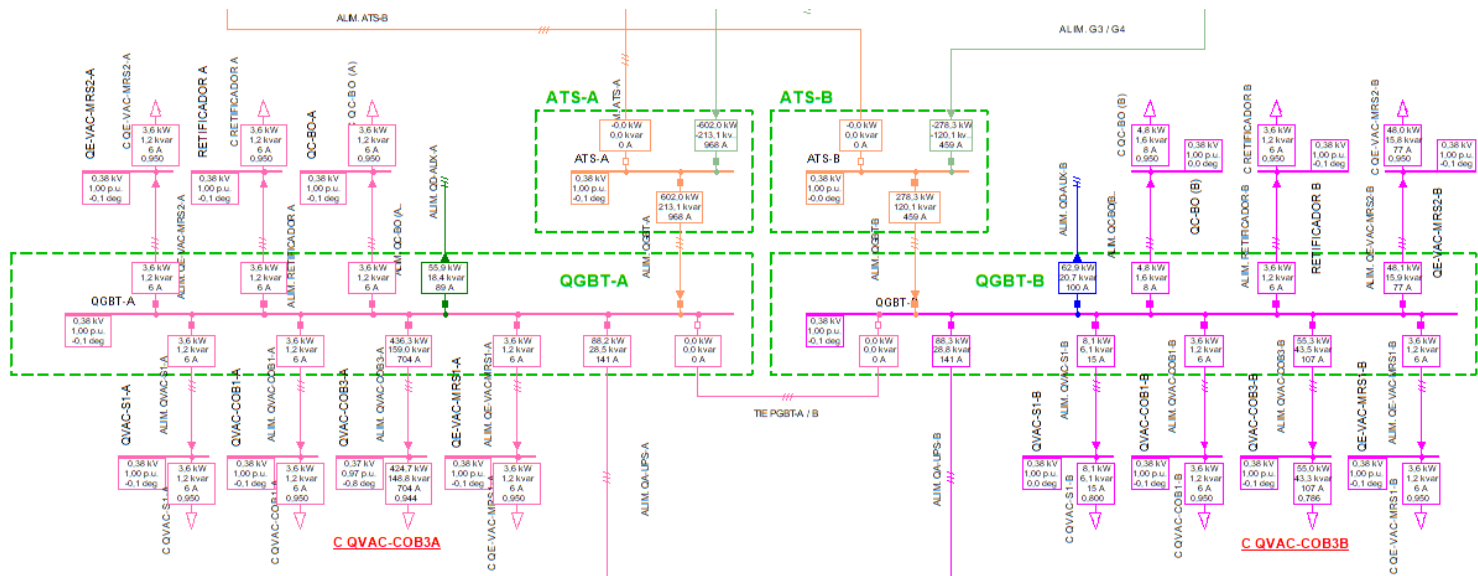


Figura 4.2: Diagrama QGBT
Fonte: GENNARI, 2016

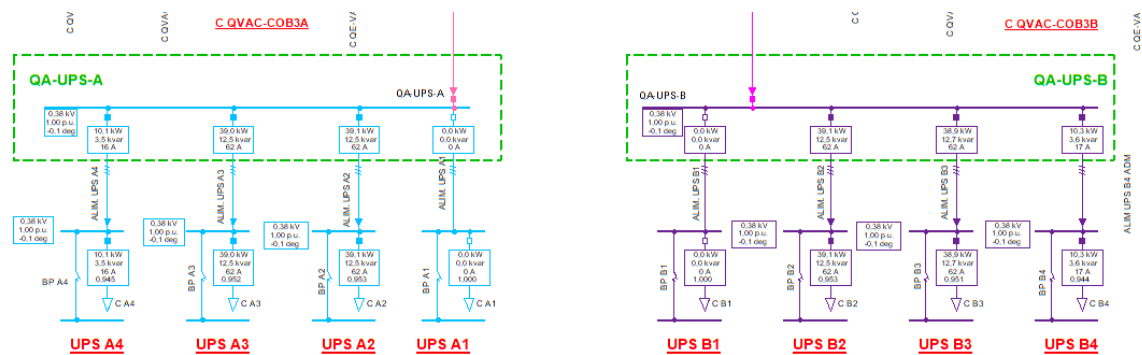


Figura 4.3: Circuitos UPS
Fonte: GENNARI, 2016

Ilustrado na figura 4.3 o detalhe da derivação da figura 4.2, exemplificando os grupos de instalação das UPS, vindos da figura 4.2, com o total 8 UPS, divididas em dois grupos.

Foi definido assim como o objetivo deste estudo medir durante o período de um mês os painéis elétricos da baixa tensão descritos nas figuras 4.2 e 4.3 enumerados conforme lista abaixo:

Ilustrado abaixo os alimentadores listados estão localizados nas figuras 4.2 e 4.3, onde o QVAC-COB-3-A, deriva do QGBT-A e QVAC-COB-3-B, deriva do QGBT-B:

- QVAC-COB-3-A
- UPS A1
- UPS A2

- UPS A3
- UPS A4
- QVAC-COB-3-B
- UPS B1
- UPS B2
- UPS B3
- UPS B4

Os espectros mostrados nos próximos itens foram obtidos dos arquivos de medição de cada ponto, lembrando que as medições foram feitas com um intervalo de 0,1 segundo:

- A. Identificado o momento de maior potência em kVA;
- B. Obtido os intervalos a cada 1 segundo que contém esta medição de maior potência;
- C. Para cada ordem harmônica, obtido o percentil 95% dentro desta amostra;
- D. Com estes valores foi montado, para cada categoria de fonte/carga, o espectro mais provável para ser usado nas simulações.

Na tabela 4.1 estão listados os valores das harmônicas medidos individuais comparados com os valores sugeridos em unidade de corrente pela norma IEEE 519 para cada caso.

Como se pode perceber os valores da tabela têm espectros bem acima dos valores aceitáveis nas medições realizadas nos painéis QVAC-COB-3-A e QVAC-COB-3-B.

Para as UPSs, os maiores valores obtidos são para a 5ª e a 7ª harmônica.

Os valores de distorção harmônica seguem conforme unidade mencionada na IEEE 519 independente da atual I_{sc}/I_L .

Onde:

- P_{cc} = Potencia de curto circuito;
- I_{sc} = máxima corrente de curto circuito até P_{cc} ;

- IL=máxima demanda de carga de corrente (componente fundamental de frequência) até Pcc.

Tabela 4.1: Valores de corrente (A) das harmônicas individuais para cada painel
Fonte: GENNARI, 2016

Ordem	UPS A4	UPS A3	UPS A2	QVAC-COB-3A	UPS B4	UPS B3	UPS B2	QVAC-COB-3B	IEEE
2	1,82	1,85	1,88	3,60	1,81	1,81	1,89	3,67	3,5
3	1,68	1,68	1,59	6,11	1,71	1,68	1,81	11,39	7
4	0,09	0,23	0,07	3,71	0,11	0,11	0,08	3,76	3,5
5	8,88	8,88	8,88	42,90	8,81	8,85	8,84	35,73	7
6	0,13	0,24	0,00	3,81	0,11	0,13	0,03	3,82	3,5
7	6,76	6,77	6,70	41,50	6,82	6,78	6,79	16,52	7
8	0,22	0,26	0,35	4,00	0,30	0,22	0,34	4,07	3,5
9	0,04	0,01	0,07	2,51	0,00	0,06	0,09	2,56	7
10	0,02	0,05	0,00	2,31	0,01	0,03	0,08	2,40	1,8
11	1,78	1,74	1,82	8,91	1,82	1,80	1,76	9,08	7
12	0,22	0,18	0,08	3,90	0,22	0,22	0,23	3,94	1,8
13	1,90	1,79	1,80	21,91	1,82	1,83	1,66	7,59	3,5
14	0,07	0,09	0,06	3,11	0,00	0,04	0,02	3,20	1,8
15	0,39	0,34	0,21	1,91	0,42	0,41	0,49	1,91	3,5
16	0,07	0,14	0,21	2,70	0,09	0,06	0,18	2,75	1,8
17	1,73	1,97	1,79	9,41	1,81	1,74	1,80	4,84	3,5
18	0,18	0,43	0,31	3,00	0,31	0,35	0,27	3,03	1,3
19	1,10	1,15	1,23	8,21	1,10	1,13	1,13	5,16	2,5
20	0,02	0,05	0,01	1,81	0,00	0,02	0,12	1,81	1,3
21	0,55	0,35	0,40	1,90	0,51	0,52	0,41	1,96	2,5
22	0,43	0,23	0,58	3,00	0,40	0,33	0,37	3,10	1,3

23	0,80	0,87	0,86	6,80	0,90	0,86	0,84	4,01	2,5
24	0,22	0,41	0,15	1,91	0,21	0,12	0,22	1,93	1,3
25	0,07	0,04	0,06	2,10	0,01	0,03	0,03	3,81	2,5
26	1,02	1,12	0,86	1,31	1,02	0,98	0,99	1,33	1,3
27	0,17	0,19	0,25	1,11	0,22	0,22	0,22	1,18	2,5
28	0,46	0,48	0,42	1,91	0,50	0,48	0,42	1,97	1,3
29	0,55	0,62	0,70	3,00	0,60	0,62	0,70	3,08	2,5
30	0,19	0,04	0,11	1,80	0,11	0,14	0,15	1,82	1,3
31	0,02	0,07	0,18	1,51	0,10	0,13	0,09	3,08	2,5
32	0,42	0,32	0,37	1,10	0,30	0,32	0,18	1,15	1,3
33	0,21	0,26	0,30	0,70	0,31	0,31	0,24	0,71	2,5
34	0,14	0,01	0,12	1,50	0,01	0,09	0,11	1,58	1,3
35	0,66	0,38	0,47	1,80	0,50	0,47	0,51	2,85	2,5
36	0,03	0,00	0,03	1,70	0,01	0,02	0,02	1,75	1,3
37	0,43	0,36	0,46	1,60	0,41	0,44	0,38	2,70	2,5
38	0,01	0,14	0,06	1,00	0,11	0,14	0,15	1,08	1,3
39	0,65	0,64	0,60	0,61	0,62	0,56	0,53	0,64	2,5
40	0,43	0,51	0,37	1,40	0,30	0,32	0,27	1,44	1,3
41	0,43	0,30	0,12	1,51	0,32	0,28	0,26	1,55	2,5

Foram simulados 9 cenários para verificação da melhor forma de sanar o impacto dos distúrbios harmônicos medidos na tabela acima, estes casos representam, para o caso de regime permanente em 60Hz, as situações de carga próximas a carga máxima do sistema. Pode-se ver que não existem sobrecargas em alimentadores nem tensões operativas fora dos padrões esperados.

Porém, a tabela 4.2 abaixo resume as medições realizadas e mostram uma pequena variação superior às tensões e correntes medidas frente aquelas simuladas para 60Hz, não sendo necessária a atuação no fator de potência. Entretanto esta

tendência na pequena variação na corrente (THDI) maior que 10% e menor que 50% já demonstra uma poluição harmônica significativa e o painel QVAC-COB-3A com variação superior a 50% revela uma poluição harmônica considerável.

Uma análise aprofundada foi necessária devido aos resultados iniciais de medição, portanto a realização de algumas simulações considerando-se as fontes harmônicas presentes será objeto dos próximos itens.

Tabela 4.2: Medições iniciais
Fonte: GENNARI, 2016

<i>Local</i>	<i>P (KW)</i>	<i>Q (kVAr)</i>	<i>S (kVA)</i>	<i>Fator Potência</i>	<i>V_{máx} pu</i>	<i>V calculado</i>	<i>THDI %</i>	<i>THDV %</i>
UPS B4	10,3	3,6	10,9	0,944	0,997	1,010	11,00	2,80
UPS B3	38,9	12,7	40,9	0,950	1,003	1,010	10,60	2,90
UPS B2	39,1	12,5	41,0	0,952	1,004	1,010	12,00	3,10
UPS A4	10,1	3,5	10,7	0,946	1,008	1,006	11,10	4,10
UPS A3	39,0	12,5	41,0	0,952	1,004	1,005	11,90	2,90
UPS A2	39,0	12,5	40,9	0,952	1,004	1,005	12,10	3,20
QVAC-COB-3A	425,0	149,3	450,4	0,943	1,011	0,975	73,60	21,62
QVAC-COB-3B	55,0	43,3	70,0	0,786	0,989	1,005	49,50	13,10

As simulações foram realizadas para nove cenários e três fases, sendo os cenários divididos conforme a tabela 4.3 abaixo considerando o tipo da fonte de operação com a letra S, quando a operação é via concessionária ou via gerador ou concessionária em paralelo com gerador aliada a porcentagem carga da UPS em operação.

Ainda na tabela 4.3 as fases foram divididas em função das porcentagens de carga das UPS, sendo a primeira fase considerando 50% da carga da UPS A3 e B3, fase 2 considerando 50% da carga da UPS A3, A2 e B3, B2, ou seja, entre as cargas do sistema e os equipamentos instalados no circuito, e Fase 3 considerando 50% da carga de todas as UPS instaladas.

Tabela 4.3 – Simulações
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
1	1ª	50%	-	-	50%	-	-	S	-	-	-	-
2	1ª	50%	-	-	50%	-	-	-	S	-	-	-
3	1ª	50%	-	-	50%	-	-	-	S	-	S	-
4	2ª	50%	50%	-	50%	50%	-	S	-	-	-	-
5	2ª	50%	50%	-	50%	50%	-	-	S	-	S	-
6	2ª	50%	50%	-	50%	50%	-	-	S	S	S	S
7	3ª	50%	50%	50%	50%	50%	50%	S	-	-	-	-
8	3ª	50%	50%	50%	50%	50%	50%	-	S	-	S	-
9	3ª	50%	50%	50%	50%	50%	50%	-	S	S	S	S

Para cada cenário acima foram investigadas as formas de onda e os THDVs e espectros de tensão.

Abaixo segue resumo em tabela 4.4 nele constam apenas a informação se foi ou não detectado distorção harmônica acima da recomendação da IEEE, considerando a média dos pontos medidos, considerando com o símbolo de igual quando os valores estão bem próximo do aconselhado pela norma, o símbolo de seta para cima, quando estão acima do recomendado pela IEEE e descrito como Somente Barra A, descrevendo que os valores estão com os níveis mais altos no caso exclusivo da Barra A, ou seja na Barra B os índices estão dentro do permitido.

Tabela 4.4: Resumo dos Cenários
Fonte: Do Autor

Cenário	Fase	Formas de Onda	Espectro de tensão	THDV's
1	1ª		Somente Barra A	Somente Barra A
2	1ª			
3	1ª		Somente Barra A	Somente Barra A
4	2ª		Somente Barra A	

5	2ª			
6	2ª		Somente Barra A	
7	3ª		Somente Barra A	
8	3ª		Somente Barra A	
9	3ª			
Legenda:  : Dentro dos limites da norma IEEE  : Acima dos limites da norma IEEE <i>Somente Barra</i> : Significa se somente a Barra mencionada está dentro dos níveis permitidos pela norma IEEE.				

Na maioria dos cenários, o lado da barra A, local onde estão instalados os equipamentos de ar condicionados estão acima do índice permitido pela IEEE. Independentemente da fonte de operação, pode-se perceber que a poluição de harmônicas existe, e nos casos de geração própria se agrava.

Ainda na tabela 4.4 as fases foram divididas em função das porcentagens de carga das UPS, sendo a primeira fase considerando 50% da carga da UPS A3 e B3, fase 2 considerando 50% da carga da UPS A3, A2 e B3, B2, ou seja, entre as cargas do sistema e os equipamentos instalados no circuito, e Fase 3 considerando 50% da carga de todas as UPS instaladas.

Nas barras da UPS, foram medidas as correntes de curto circuito, quando operadas via gerador ou não, a diferença entre as barras A e B são mínimas em torno de 2kA, o vale ser ressaltado neste trabalho é o valor de 49,97kA quando operado via concessionária, o valor de 11,26kA quando operado com apenas um gerador e o valor de 21,79kA quando operado com dois gerados independentes da concessionária

Sem a concessionária, diminui a capacidade do(s) gerador(es) de manter a tensão senoidal devido a presença de cargas não lineares no sistema: as UPSs e principalmente as cargas de ar condicionado.

Os resultados detalhados dos cenários estão no apêndice deste trabalho a seguir é exemplificado apenas o resumo do cenário 2, que foi identificado como o mais crítico.

Cenário 2

Tabela 4.5: Cenário 2
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
2	1ª	50%	-	-	50%	-	-	-	S	-	-	-

O sistema está em redundância, ou seja, as UPS somente irão funcionar sozinhas em um momento emergencial, ou seja, caso a UPS de mesma numeração, parceira, falhe. Por este motivo foi simulado o pior caso numa rotina usual no data center, ou seja 50% da carga de cada uma.

Neste cenário foi simulado 50% das cargas da UPS A3 e B3, com a fonte de alimentação do gerador 1, conforme ilustrado na tabela 7.

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores muito acima de 5% para as barras de BT, esta porcentagem revela uma poluição de harmônica considerável, conforme se pode ver na figura 4.4, que demonstra através das barras dos circuitos da figura 4.1 os valores de THDVs medidos.

Neste caso, a troca da concessionária pelo gerador G1(conforme realizado no cenário 1) diminuiu a capacidade de curto circuito do sistema fonte e consequentemente ocorreu o aumento das distorções do sistema.

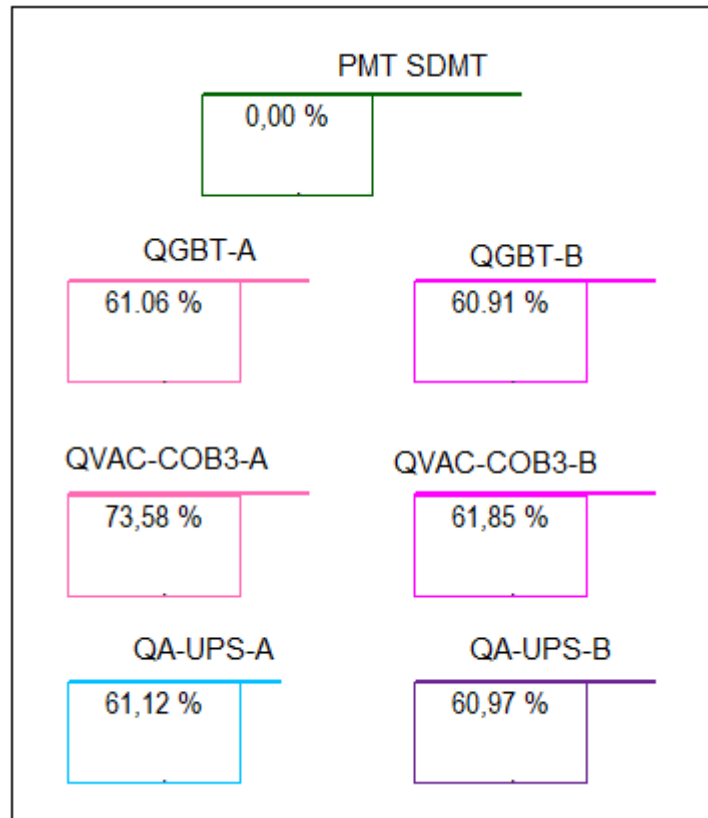


Figura 4.4: THDV's - Cenário 2
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Já os espectros de tensão para as barras de baixa tensão, conforme figura 4.5 refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma, que são as destacadas pelas barras hachuradas vermelhas.

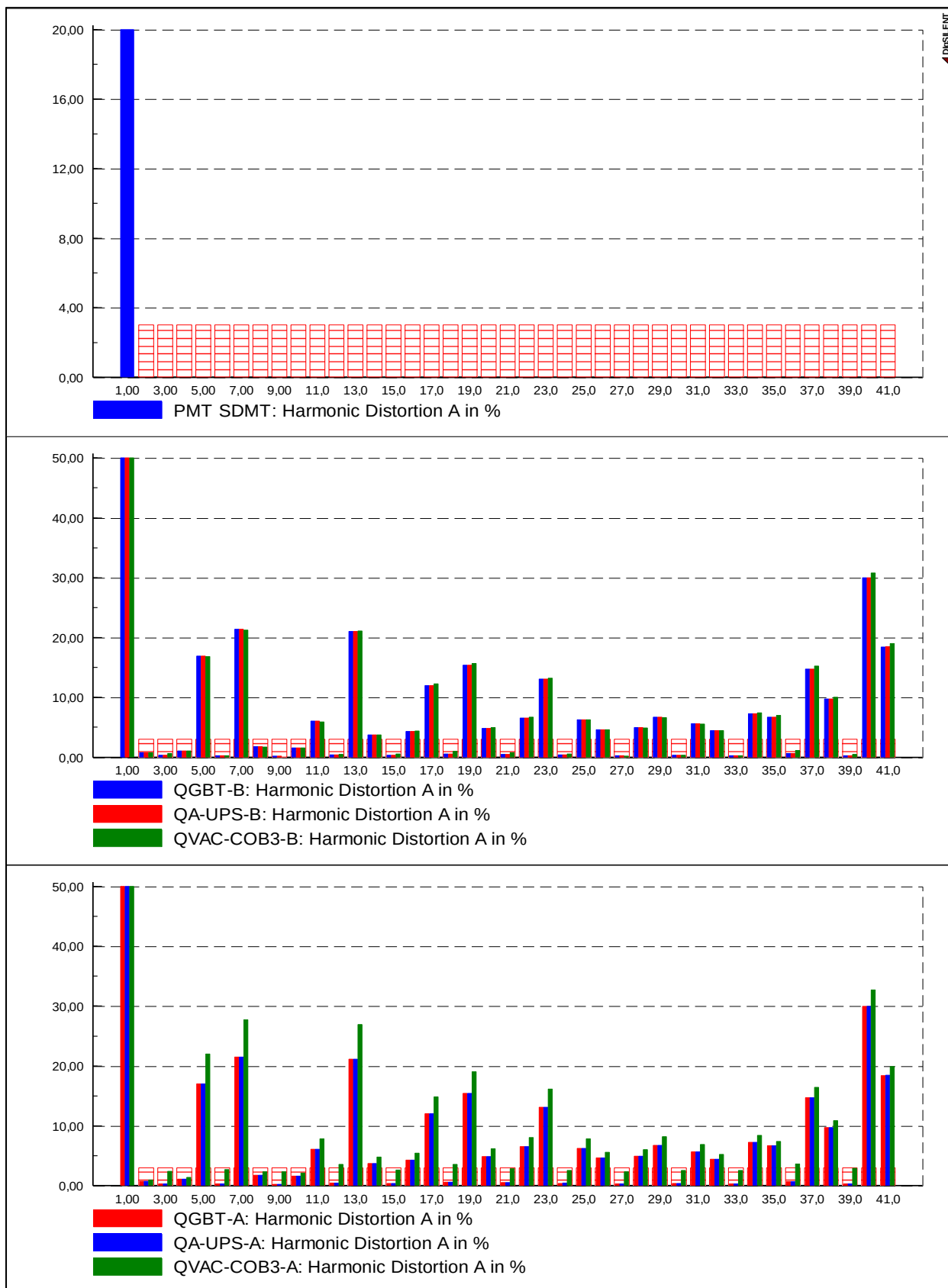


Figura 4.5: Espectro de tensão - Cenário 2
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A, conforme figura 4.6 reflete alta distorção, já que a senoide não segue perfeitamente uma onda perfeita e possui vários picos e declives bem consideráveis. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

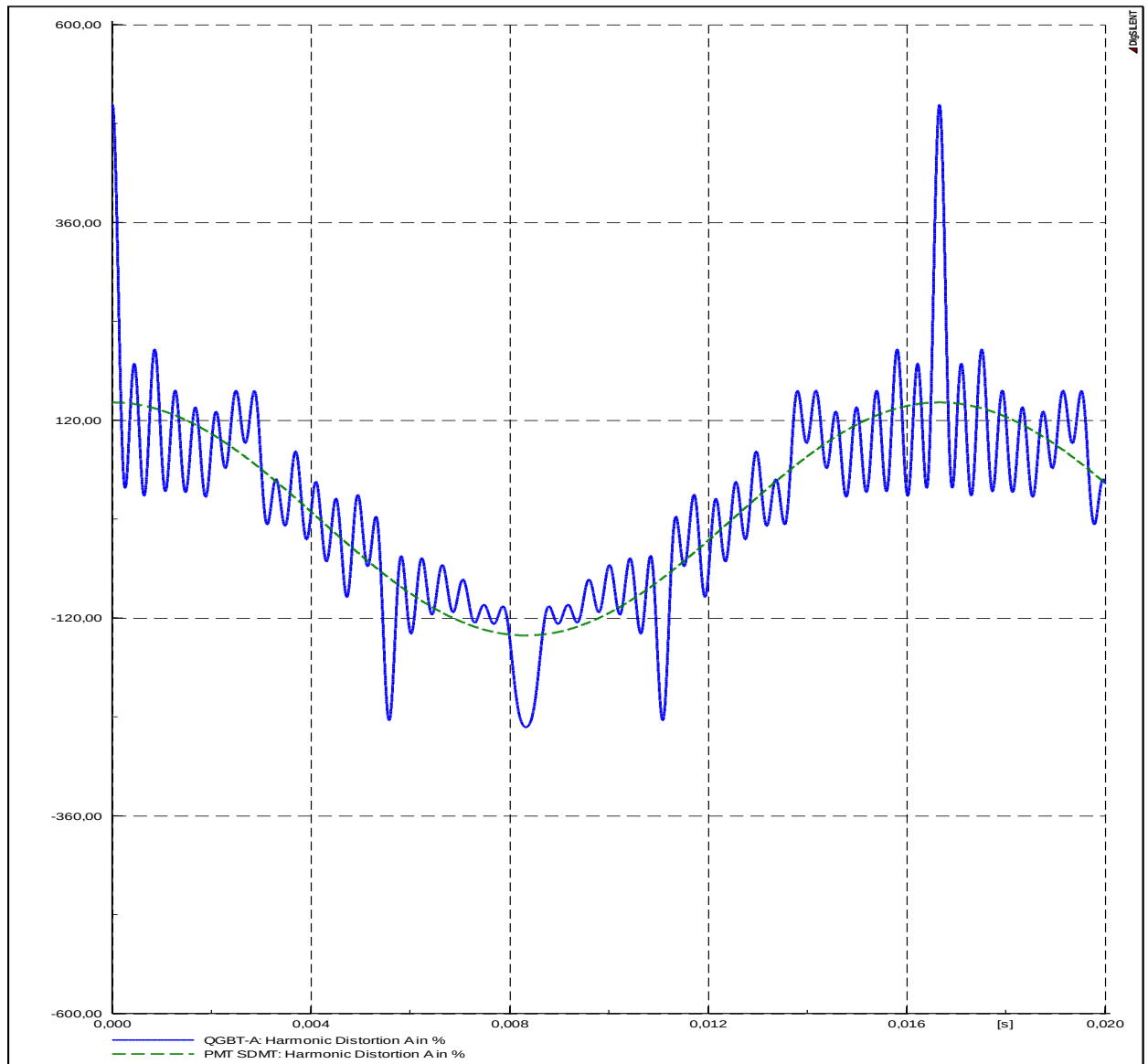


Figura 4.6: Forma de onda de tensão - Cenário 2
Fonte: GENNARI, 2016

4.3 Resultados

Os resultados obtidos para as barras são suficientemente significativos para representar o sistema como um todo. A seguir apresentamos na figura 4.7 os resultados compilados em forma de gráfico mostrando a evolução dos THDVs por cenário e por barra.

Como se pode ver o cenário com maior índice de distúrbios harmônicos é o cenário 2, onde 50% de carga da UPS A1 e B1, considerando a alimentação via o Gerador 1.

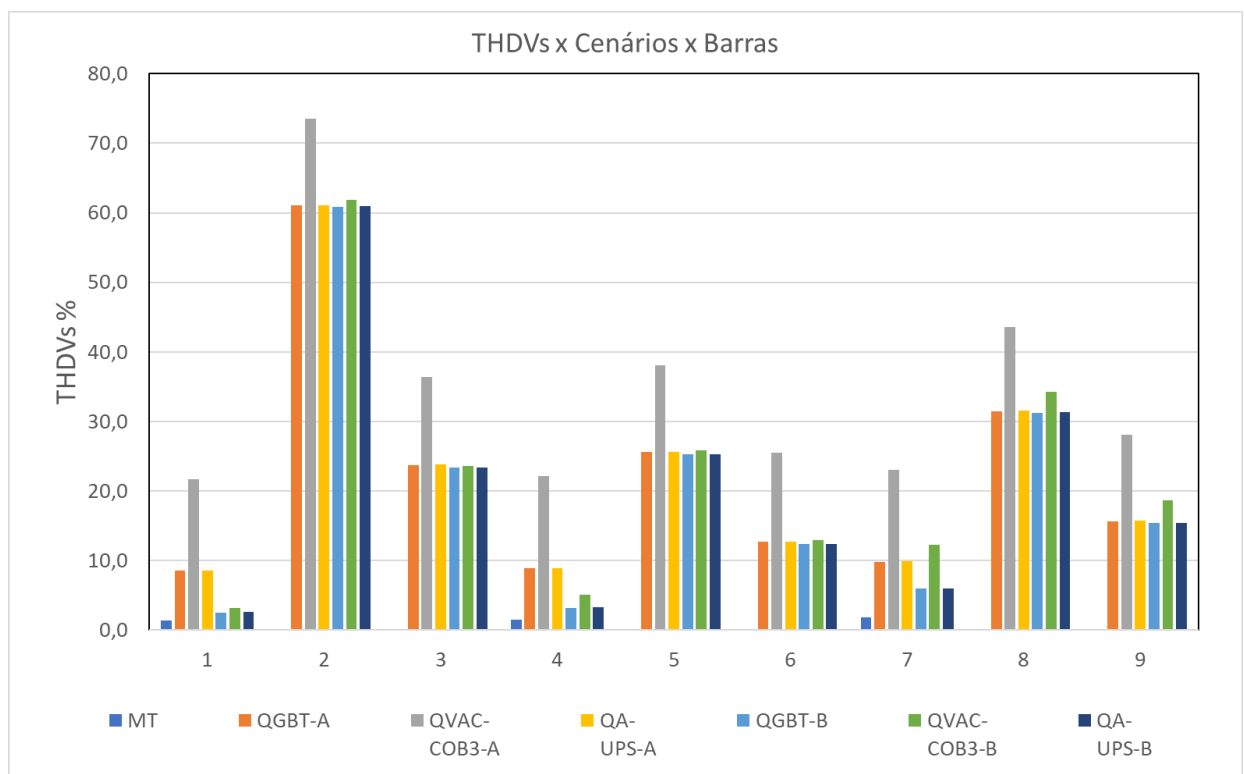


Figura 4.7: Evolução dos THDVs por cenário e por barra
Fonte: GENNARI, 2016

Desta análise podemos concluir que:

- 1) O THDV aumenta com o aumento da carga das fontes harmônicas. Notadamente as cargas de Ar Condicionado são as que mais contribuem para isso, apesar das UPSs também serem fontes que devem ser minoradas;

- 2) O THDV aumenta quando a operação do sistema é feita através de geração própria. Mesmo no Cenário 9, com 4 geradores em operação, os valores de THDV são altos devido ao aumento da carga harmônica das fontes;
- 3) Apesar dos altos valores de THDV calculados, a sua origem não é de ressonâncias do sistema e sim das fontes existentes: cargas de AC e das UPSs;
- 4) Conforme observado na tabela 4.2 a maioria das cargas medidas possui um fator de potencia adequado com exceção apenas da carga QVAC-COB-3B.
- 5) Sugere-se então apenas instalação dos filtros ativos junto as principais fontes de harmônicas.

Desta forma foi determinada a utilização de filtros instalados na UPS e nos equipamentos de ar condicionado.

As medições realizadas identificaram a presença de fontes de correntes harmônicas em vários pontos do sistema elétrico. Estas fontes são divididas em dois grupos: as fontes do sistema de Ar Condicionado e as UPSs.

As simulações mostraram que, quando o sistema estiver operando via Geradores, as distorções de tensão aumentam o suficiente para interferir na regulação e sincronismo do sistema.

Como não existe a necessidade de correção de Fator de Potência, foi recomendada a inserção de Filtros ativos. Os resultados das simulações mostram que com estes filtros as distorções diminuem consideravelmente mesmo para o pior caso.

Como sugestão de ações de melhoria a serem implementadas para as barras listadas tem -se:

- a. Mitigação das fontes com a troca da tecnologia de retificação dos inversores que estão instalados.
- b. Esgotadas as possibilidades de atuação diretamente nas fontes, foi sugerida instalação de filtros ativos modulares em etapas para um melhor acompanhamento dos resultados, conforme especificação do

apêndice A, nas seguintes barras e com as seguintes correntes:

Neste caso foi selecionado como melhor opção os filtros ativos monofásicos, visto que neste caso variações das ordens harmônicas são rápidas no tempo e possuem distorções de tensão muito altas, filtros passivos não são recomendados visto que não existe necessidade de inserção de potência reativa para ajuste de fator de potência nem de ressonância.

Na figura 4.8 abaixo, pode-se perceber um esboço do filtro selecionado para esta instalação, trata-se de um filtro de derivação, este capaz de injetar corrente que somada a corrente de carga produzirá uma corrente “limpa” no circuito do datacenter.

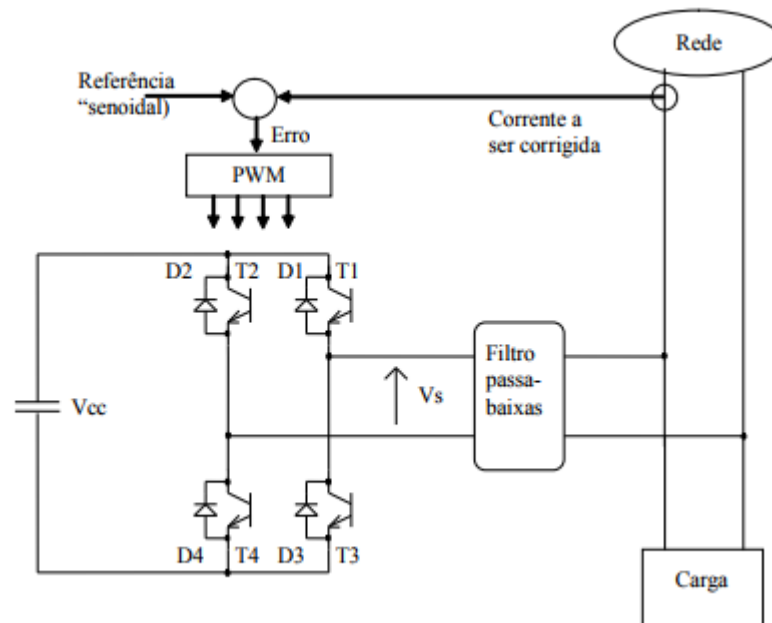


Figura 4.8: Filtro de derivação
Fonte: Polimilio, 2006

O filtro ativo foi dimensionado com base na corrente harmônica, utilizando software mencionado no início deste capítulo os cálculos específicos. Porém, os motivos técnicos para a escolha do filtro não foram liberados para divulgação neste trabalho, já que foi um estudo técnico desenvolvido pelo Data Center.

Somente foram fornecidas e divulgadas as etapas envolvidas para implementação das correções, além de algumas informações técnicas, como

capacidades dos filtros ativos de harmônicas escolhidos, quantidades e valor de investimentos e benefícios, conforme apresentado na sequência.

ETAPA 1

QVAC-COB3- A 1ª/2ª/3ª Fase 3 x 300A

QVAC-COB3- B 1ª/2ª/3ª Fase 3 x 300A

Cada QVAC deve receber um filtro monofásico de 300A de cada vez (1ª, 2ª e 3ª fase). Sugerimos que após a instalação do primeiro módulo de 300A seja feita uma medição rápida de harmônicas. Após esta medição decidiremos se será necessário mais um módulo de 300A.

ETAPA 2

UPSs A1/A2/A3/B1/B2/B3 1ª/2ª/3ª Fase x 100A

(3n+1) x 100kVA

Cada módulo de 100kVA deve receber um filtro de 100A. A sugestão é serem instalados filtros modulares de 100A em 3 fases e após ser feita uma medição rápida de harmônicas. Após esta medição decidiremos se são necessários mais módulos de 100A.

5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

5.1 Análise de viabilidade técnica

Desta forma o Data Center aprovou a instalação da Etapa 1, visto que se tratava de um distúrbio harmônico de grande impacto, que impossibilitava inclusive a operação somente via geradores, como pode-se ser visto na análise do capítulo acima.

Depois de instalado os filtros propostos, foram realizadas medições, onde se verificou que houve reduções significativas na poluição das harmônicas.

Como nos estudos iniciais foi verificado que o cenário 2 era o mais crítico, com o pior resultado para os THDVs ficou definido uma nova simulação considerando este cenário. Abaixo pode-se ver o resumo dos resultados.

THDVs

Com a instalação dos filtros ativo, na figura 5.1 é demonstrado o valor dos THDVs medidos antes de depois da instalação do filtro ativo. Neles podemos perceber os valores muito próximos de 5% para as barras de BT, ou seja, claramente a instalação reduziu o número de harmônicas, deixando bem próximo do permitido pela IEEE.

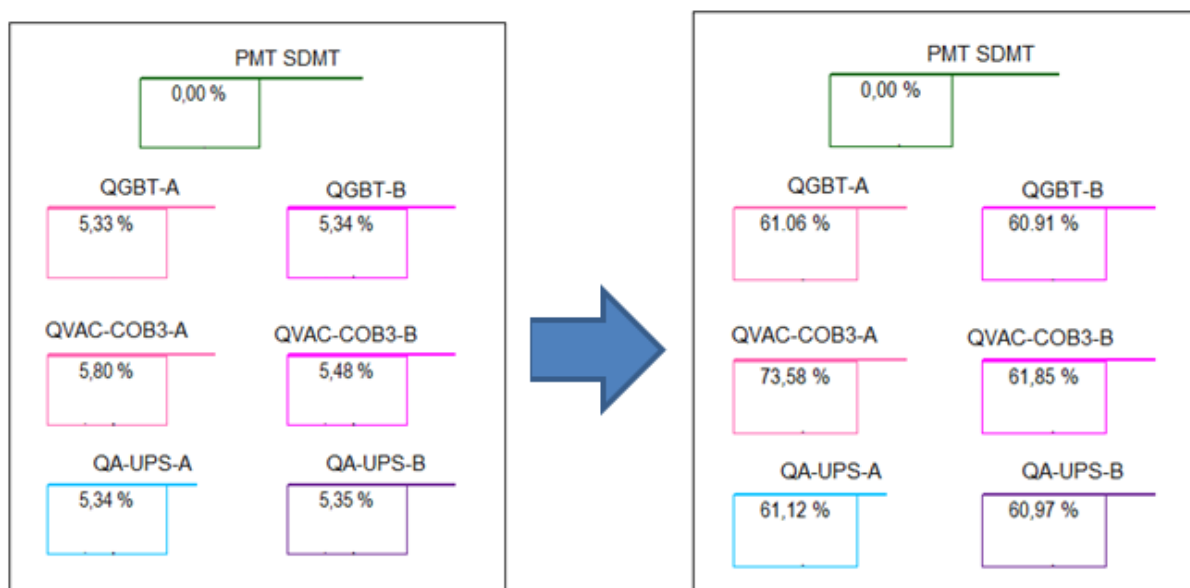


Figura 5.1: THDVs Cenário com Filtro

Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Já os espectros de tensão abaixo na figura 5.2 refletem para as barras de BT os valores dos THDVs após a instalação dos filtros ativos mostram valores individuais para as ordens harmônicas menores que o esperado para a norma, sendo os valores aconselhados destacados com barras hachuradas vermelhos.

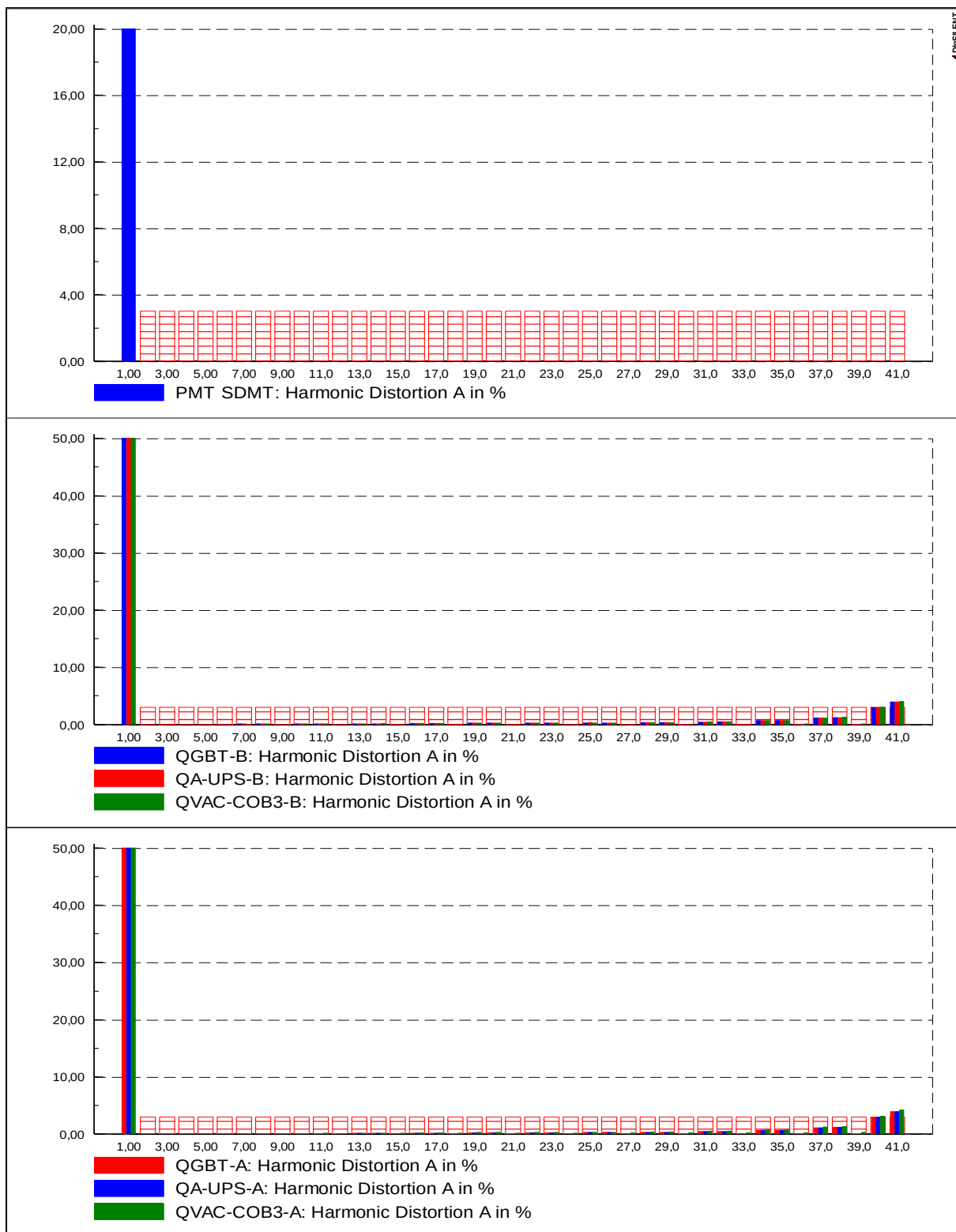


Figura 5.2: Espectro de Tensão - Cenário 2

Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

Com a instalação do filtro ativo a forma de onda apresentada para a barra do Lado A, conforme pode ser visto no lado direito da figura 5.3, refletindo assim pequenas oscilações que ocorrem nas frequências mais altas que podem ser consideradas normais para este tipo de instalação, demonstrando assim uma redução de perturbação das harmônicas visivelmente consideráveis.

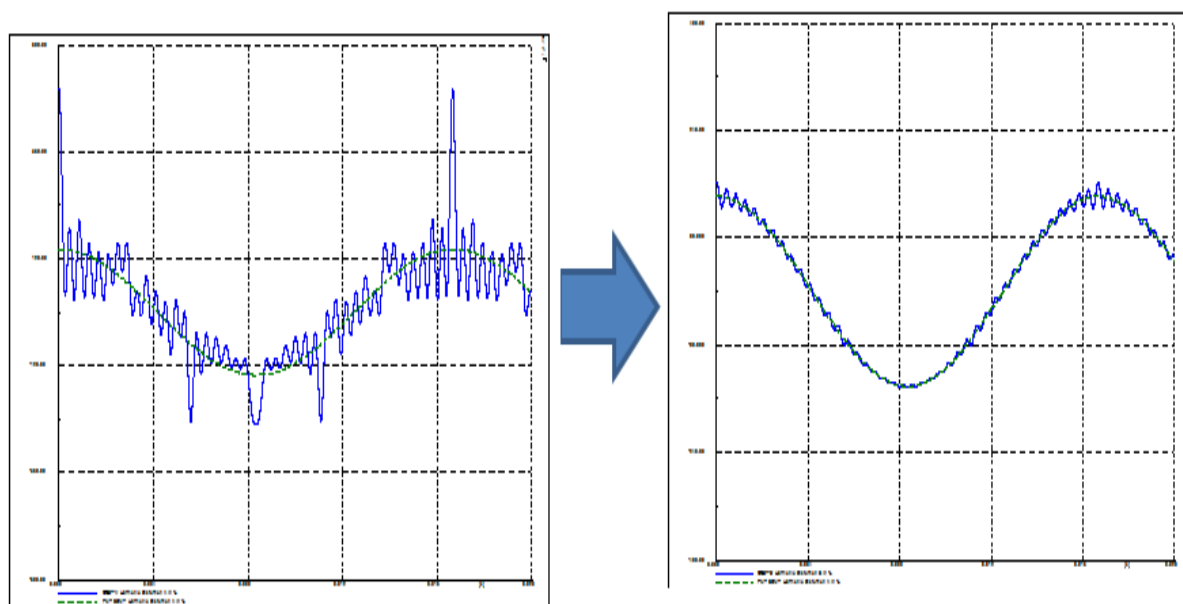


Figura 5.3: Forma de Onda Cenário 2

Fonte: GENNARI, 2016

Tecnicamente o projeto teve um alto índice de sucesso e aprovação após a instalação do filtro ativo.

5.2 Análise da viabilidade econômica

Para cálculo no retorno econômico deste projeto, foi considerado todo o investimento inicial para a instalação dos filtros, ou seja, custo de engenharia, desenvolvimento, material, equipamentos e instalação, como se pode ver na tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 Resumo investimento inicial
Fonte: Do Autor

Custo de compra de 6 Filtros	R\$ 682.500,00
Custo de instalação e adequação	R\$ 292.500,00
Custos de hora de estudo da rede e outros	R\$ 10.000,00
Custos totais	R\$ 985.000,00

A forma de cálculo de perdas harmônicas foi calculada em software e não foi permitida a divulgação neste trabalho. Entretanto foi disponibilizado os valores de perdas para cálculo de retorno no investimento, com os dados das perdas anuais causadas pelas harmônicas antes da instalação dos filtros (Gasto Adicional R\$ por ano sem filtro) valor da energia em torno de R\$0,15kWh e considerando o custo adicional que a instalação dos filtros trouxeram (Gasto Adicional R\$ por ano com filtro), como pode ver na tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2: Perdas Harmônicas
Fonte: Do Autor

Painel	Perdas causadas por Harmônicas Kw	Nº Horas por dia	Energia adicional kWh por ano	Gasto Adicional R\$ por ano sem filtro	Gasto Adicional R\$ por ano com filtro
QVAC-COB3- A	625,5	6	1.351.080	195.906,00	17.635,00
QVAC-COB3- B	128,0	6	276.048	40.027,00	22.022,00
TOTAL ANUAL				235.933,00	39.657,00

Considerando os investimentos iniciais o cliente teve um payback simples do investimento em aproximadamente 5 anos, baseando-se apenas em um investimento de quase um milhão de reais dividindo pelo retorno anual de quase

duzentos mil reais, teremos o retorno deste investimento desconsiderando a estimativa de inflação.

A tabela 5.3 abaixo apresenta o cálculo já considerando a depreciação de juros com a taxa de 6%, que tem sido a média dos últimos cinco anos do índice do IPCA teremos um payback descontado de 6,5 anos, o que ainda mantém um índice considerável de viabilidade para aprovação, caso estivesse sido levado em consideração à viabilização econômica neste projeto.

Tabela 5.3: Payback descontado
Fonte: Do Autor

ANO	Valor Projeto	Fluxo Valor Presente taxa de 6% a.a	Saldo Valor Presente
0	-R\$ 985.000,00		-R\$ 985.000,00
1	R\$ 196.276,00	R\$ 184.499,44	-R\$ 800.500,56
2	R\$ 196.276,00	R\$ 173.429,47	-R\$ 637.476,85
3	R\$ 196.276,00	R\$ 163.023,71	-R\$ 474.453,15
4	R\$ 196.276,00	R\$ 153.242,28	-R\$ 321.210,87
5	R\$ 196.276,00	R\$ 144.047,75	-R\$ 177.163,12
6	R\$ 196.276,00	R\$ 135.404,88	-R\$ 41.758,24
7	R\$ 196.276,00	R\$ 127.280,59	R\$ 85.522,35

A preservação dos periféricos com a instalação dos filtros teve um valor econômico bem considerável em questão deste investimento.

Porém, não foi possível mensurar em valores o retorno econômico, entretanto foi o item determinante para a viabilização mesmo que não calculado, visto que se trata de uma instalação que exige um alto índice de confiabilidade, já que a intermitência da operação, mesmo que em ordem de segundos, é crítica para o bom funcionamento do sistema e impacta diretamente no sucesso do empreendimento.

Nesta instalação o cliente não estava apto nem ao menos em utilizar o sistema de geração própria de forma única em nenhum momento do dia, devido à alta poluição de harmônicas como pode ser visto no estudo de caso. Por este motivo o tratamento do alto índice de poluição de harmônicas era essencial para a continuidade deste empreendimento de maneira satisfatória e o valor de investimento relativamente se comparado a grandiosidade dos impactos que estavam sofrendo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação geral e completa da situação atual sobre os problemas com a qualidade de energia que estamos enfrentando nos últimos tempos.

Qualidade da energia elétrica está cada vez mais presente nas questões e debates técnicos. Todo o setor exige um abastecimento de energia elétrica com maior qualidade seja industrial, comercial ou residencial, uma vez que em seus ambientes internos a inserção de equipamentos eletrônicos e digitais está cada vez mais em alta, além da busca incessante por sistemas de alta eficiência energética cada vez maiores. Assim, procurou-se nos capítulos iniciais ressaltar um breve histórico sobre Qualidade da Energia. Verificou-se que já é de longa data o receio com a qualidade do abastecimento da energia elétrica.

Destacaram-se similarmente as principais definições dos fenômenos que interferem na Qualidade da energia de um sistema elétrico, no qual a mesma apresenta os princípios para cada forma de acontecimentos.

Esses dados foram usados como informações para assinalar os distintos tipos de distúrbios analisados neste trabalho, com foco nos nichos que mais possuem cargas geradoras de harmônicas, como grupo moto-geradores, fornos da área de metalurgia, sistemas de proteção e equipamentos de chaveamento, equipamentos estes, que não são de exclusividade de apenas uma determinada tipologia de empreendimento.

Como forma de exemplificar foi ressaltado pontos para análise e melhoria para assim conseguir uma qualidade eficaz na eficiência energética, tema intensamente abordado em todos os níveis e setores não só o elétrico.

O objetivo deste trabalho foi levantar possibilidades técnicas para resolver problemas recorrentes como a influência das harmônicas em vários meios, além da importância do ajuste do fator de potência e de transitórios nas redes.

A rede elétrica trata-se de uma grande “salada russa”, com efeitos desencadeados por diversos problemas, que em muitos casos são de difíceis resoluções. Os transitórios na distribuição de energia são uma realidade que

infelizmente em muitos casos temos que conviver. Por este motivo foi escolhido um caso de uso para ajudar na redução dos impactos dos transitórios.

Através do estudo de uso apresentado, foi possível ter claramente a percepção sobre os benefícios de tratar os distúrbios harmônicos em uma instalação de altíssima confiabilidade e responsabilidade crítica, que é o Data Center.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001.

ANEEL, **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>, acessado em 22/09/2017.

AUTOMATEC, **Inversores de Frequencia**. Disponível em: < <http://automatecbrasil.comunidades.net/inversores-de-frequencia/>>, acessado em 21/09/2017.

BRAGA, Marcelo F.; D'ÁVILA, Ricardo de Castro; Silva, Sidelmo M. **Aplicação de filtros ativos e passivos de potência: estudo de caso**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2009.

CÂMARA, Keyla S; LEÃO, Ruth P. S.; ANDRADE, Kleber R. A. **Desempenho de filtro harmônico em planta siderúrgica**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2004.

CARVALHO, R. **Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica**. MONOGRAFIA – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

CODI – **Manual de orientação aos consumidores: Energia Reativa Excedente**. Comitê de Distribuição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2004.

CUCCIS, C. Louis. **Harmonics, sidebands, and transients in communication engineering, as studied by the fourier and laplace analyses**. New York: McGraw-Hill, 1952.

DAS, J. C. **Power System Analysis**. New York: Marcel Dekker, 2002.

DIAS, G. A. D., **Harmônicas em Sistemas Industriais**. Segunda edição, EDIPUCRS, 1998.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F. and WAYNE BEATY, H. 1996. **Electrical Power Systems Quality**. New York, McGraw-Hill.

Engineering Society, **Sine-wave Distortions in Power Systems and the Impact on Protective Relaying**. Report prepared by the Power System Relaying Committee of the IEEE Power. Novembro 1982.

FASSBINDER, Stefan. **Melhorando a compatibilidade eletromagnética das instalações**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2007.

FLÜGEL, Thomas. **Conectores de seccionamento de neutro em instalações com harmônicas - sim ou não?** *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2006.

FOULADGAR, J., CHAUVEAU, E., **The Influence of the Harmonics on the Temperature of Electrical Machines**, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, nº5, 2005.

GENNARI, JORGE L, **Relatório técnico Estudo de Fluxo de Harmônica Empresa H**, MANTEST ENGENHARIA, 2016.

HARRINGTON, Roger F. **Time-harmonic electromagnetic fields**. New york: McGraw-Hill, 1961.

IEC 61000-3-2. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions**. Suíça, 2009.

IEEE Std 519-1992. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. Segunda impressão, EUA, 2004.

IEEE, **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. Project IEEE-519. October 1991.

Inst. Of Elect. & Electronic. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 1995. ISBN: 1559375493.

ISONI, Marcos. **Os efeitos da efficientização energética sobre os equipamentos e instalações**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2004.

KOUYOUMDJIAN, Aro. **A compatibilidade eletromagnética**. São Paulo, 1998.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, J. L. P. C. **Seleção e aplicação de motores elétricos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

MACEDO, José R.; Resende, José W. **Alocação ótima de filtros, capacitores e cargas no contexto da qualidade da energia elétrica**. In: XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Campinas, 2001.

MARTINS, Alexandre. **Entendendo o fator de potência**. Porto Alegre: CP Eletrônica, 2008.

OLIVEIRA, Gustavo H.C.; GARCIA, Flávio; SANCHES, Thiago P. **Análise de protocolos de medição de harmônicos em sistemas elétricos de potência**. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Uberlândia, 2003.

ONS. Procedimentos de Rede. **Padrões de Desempenho da Rede Básica**. 2009.

POMILIO, José A. **Harmônicos – Componentes semicondutores de potência**. *O setor elétrico*, São Paulo, 2006.

POMILIO, José A. **Harmônicos - Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica (parte 1)**. *O setor elétrico*, São Paulo, 2006.

POMILIO, José A. **Harmônicos - Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica (parte 2)**. *O setor elétrico*, São Paulo, 2006.

SCHNEIDER Electric; PROCOBRE Instituto Brasileiro do Cobre. **Qualidade de Energia Harmônicas**. *Workshop: Instalações Elétricas de Baixa Tensão*, [SL], mar 2003.

SCHNEIDER ELECTRIC, **Qualidade de energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.ess-br.com.br/qualidade-de-energia-eletrica/>>, acessado em 21/09/2017.

SENA, Carlos. **Combate ao desperdício de energia elétrica: Fator de potência**. Espírito Santo, 2005.

SOUTO, Olívio C. N.; OLIVEIRA, José Carlos de. **Impactos térmicos e econômicos da qualidade da energia em motores de indução trifásicos**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2005.

SOUZA, Luiz F. W.; ROSS, Ricardo Penido Dutt. **Experiências relevantes em monitoração e análise da qualidade da energia elétrica**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2004.

STAROSTA, José. **Qualidade da energia nos processos industriais e produtividade - Classificação dos fenômenos eletromagnéticos**. *O setor elétrico*, São Paulo, 2006.

STAROSTA, José. **Qualidade da energia nos processos industriais e produtividade – Classificação dos fenômenos eletromagnéticos**. *O setor elétrico*, São Paulo, 2006.

TAMIETTI, Ricardo. **Compensação reativa e a correção do fator de potência**. Belo Horizonte: Engeweb, 2007.

UNGER, Christian; KRÜGER, Kurt; SONNENSCHNEIN, Martin; ZUROWSKI, Rainer. **Perturbações decorrentes de distorções de tensão na faixa de kHz**. *Eletricidade Moderna*, São Paulo, 2006.

WESTON, David A. **Electromagnetic compatibility: principles and applications**. New York: Marcel Dekker, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DOS FILTROS DO CENÁRIO 2

Especificação de Filtros Ativos

Tabela A.1: Especificação Filtro
Fonte: Do Autor

Corrente Nominal - RMS – 60Hz	100A e 300 ^a
Tensão RMS	208V < U < 600V
Tolerância de Tensão	± 10%a
Tolerância de Frequência	± 5%
Corrente de Neutro	3 x Corrente Nominal
Transformador de Corrente	5Asec – 5VA – 3 unidades – Inclusas
Modularidade	Mínimo de 10 unidades em paralelo
Montagem	Uma unidade por painel
Harmônicas a serem filtradas	15 harmônicas selecionadas da 2 ^a a 50 ^a
Grau de Filtragem	Programável individualmente
Fator de Atenuação da Harmônica	Mínimo 97% - $I_{h_{fonte}} / I_{h_{carga}}$
Fator de Potência	Programável de 0,6 indutivo a 0,6 capacitivo
Balanceamento de Carga	Programável entre fases e entre fase e neutro
Tempo de resposta	40 ms
Perdas em W	< 3% da potência nominal
Grau de Proteção	IP 30
Instalação	Auto portante ou fixação em parede
Temperatura	-5°C a 40°C
Umidade Relativa	Máximo 95%
Comunicação	Modbus – RS 232
Programação	Fornecer software

APÊNDICE B – CENÁRIOS

As informações a seguir visam apresentar, de forma geral, o resumo dos demais cenários que foram considerados para o estudo de harmônicas para o estudo de caso.

Cenário 1

Tabela A.2 : Cenário 1
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
1	1ª	50%	-	-	50%	-	-	S	-	-	-	-

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores acima de 5% para as barras de BT do Lado A. Isto pode ser explicado pela maior potência considerada para a barra QVAC-COB3-A que concentra as cargas do sistema de ar condicionado.

As barras de MT não apresentam valores elevados.

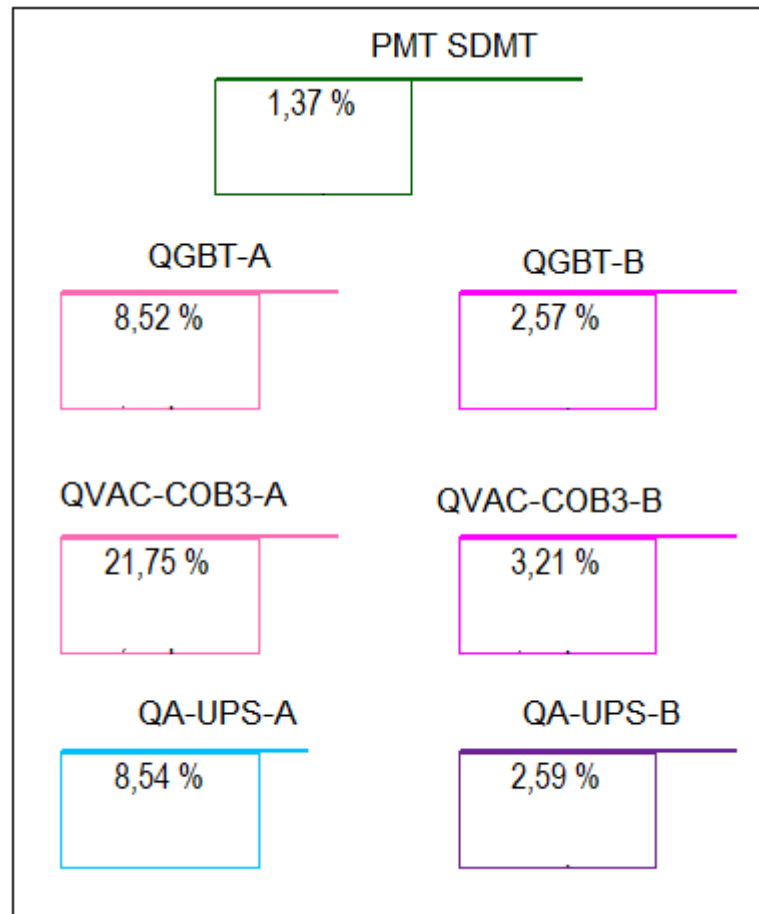


Figura A.1: THDV'S Cenário 1

Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

Para o sistema de MT não ocorreram valores acima da referência.

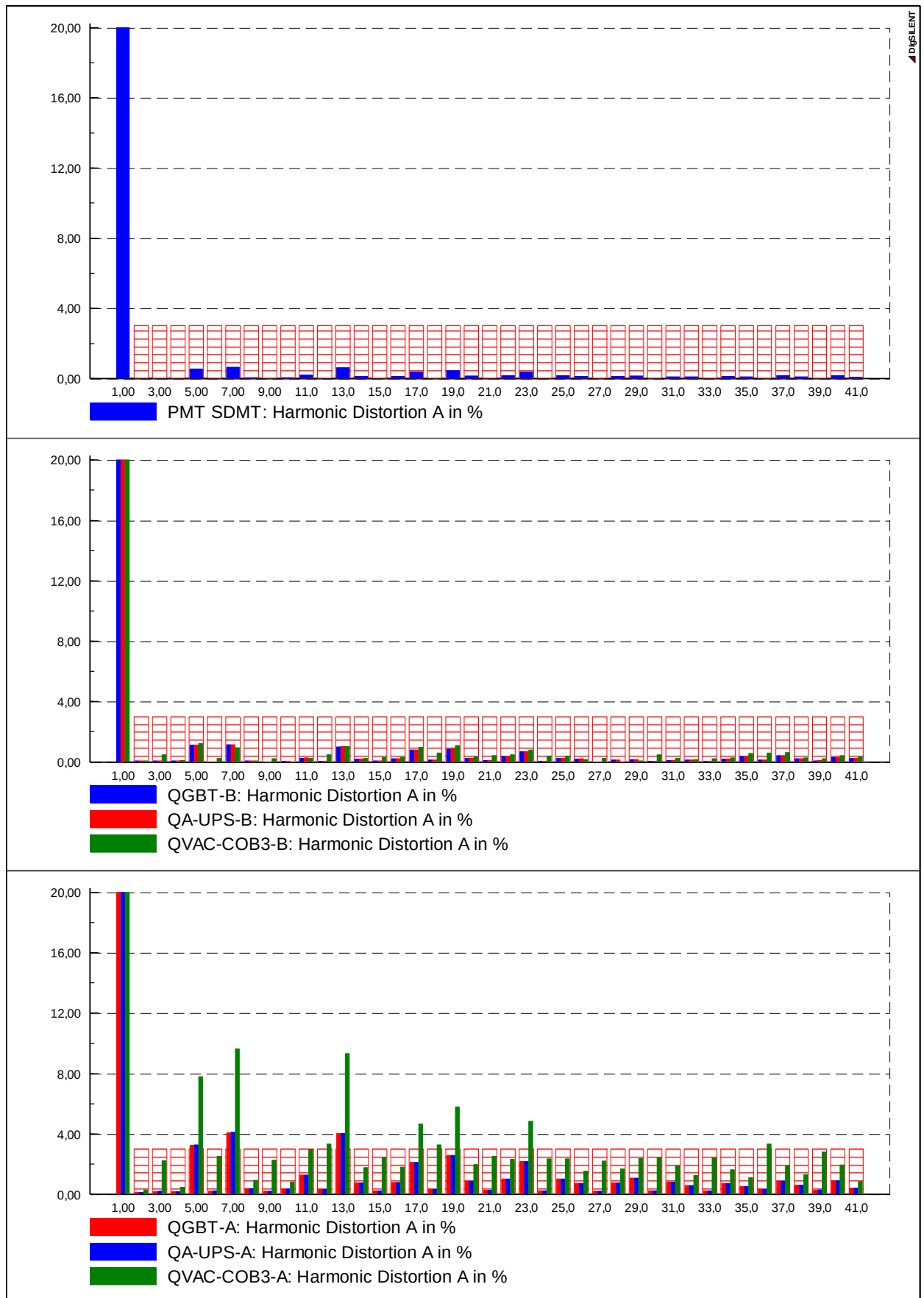


Figura A.2 : Espectro de Tensão - Cenário 1
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada.

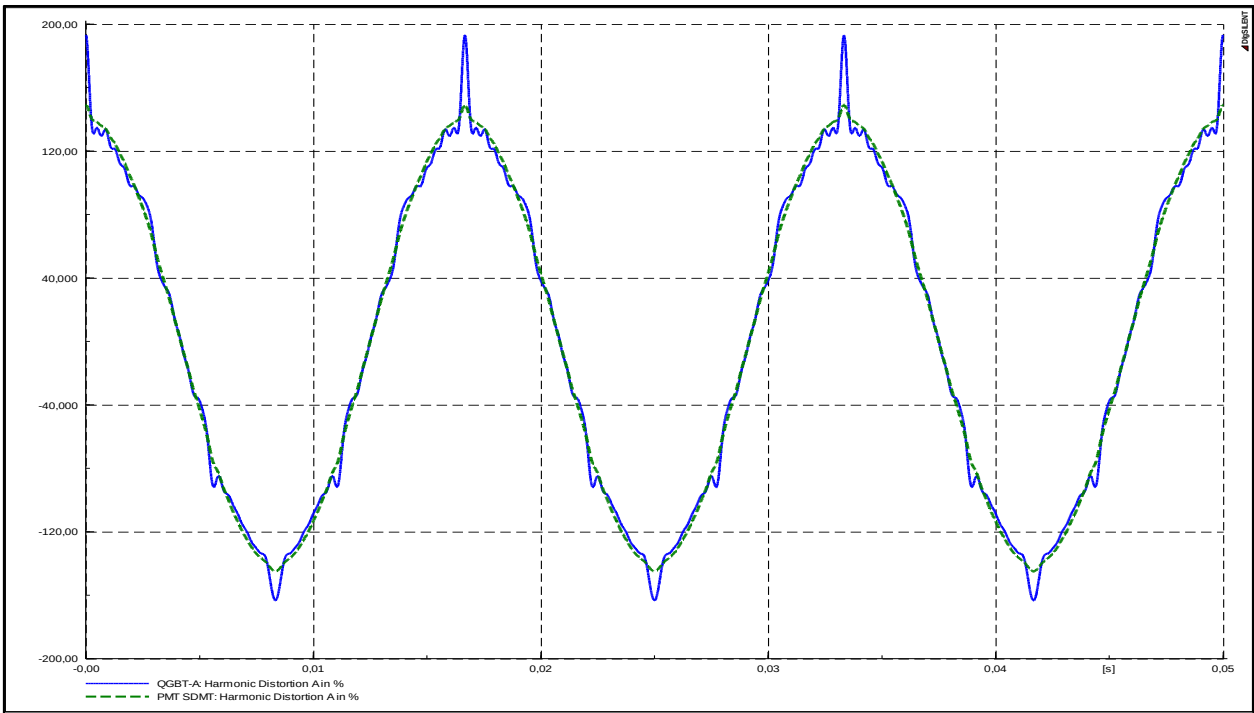


Figura A.3 : Forma de Onda - Cenário 1
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 3

Tabela A.3 - Cenário 3
Fonte: GENNARI, 2016

		Carga das UPSs						Fonte em Operação				
Cenário	Fase	A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
3	1ª	50%	-	-	50%	-	-	-	S	-	S	-

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores muito acima de 5% para as barras de BT. Neste caso, a troca da concessionária pelos geradores G1 e G3 diminui a capacidade de curto circuito do sistema fonte e consequentemente ocorre o aumento das distorções do sistema.

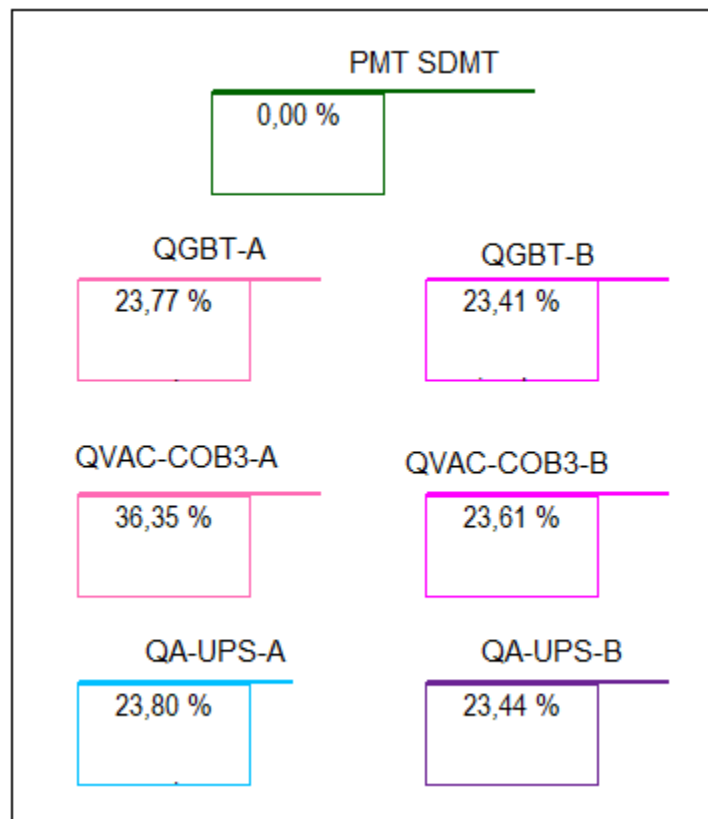


Figura A.4 : THDV'S - Cenário 3
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

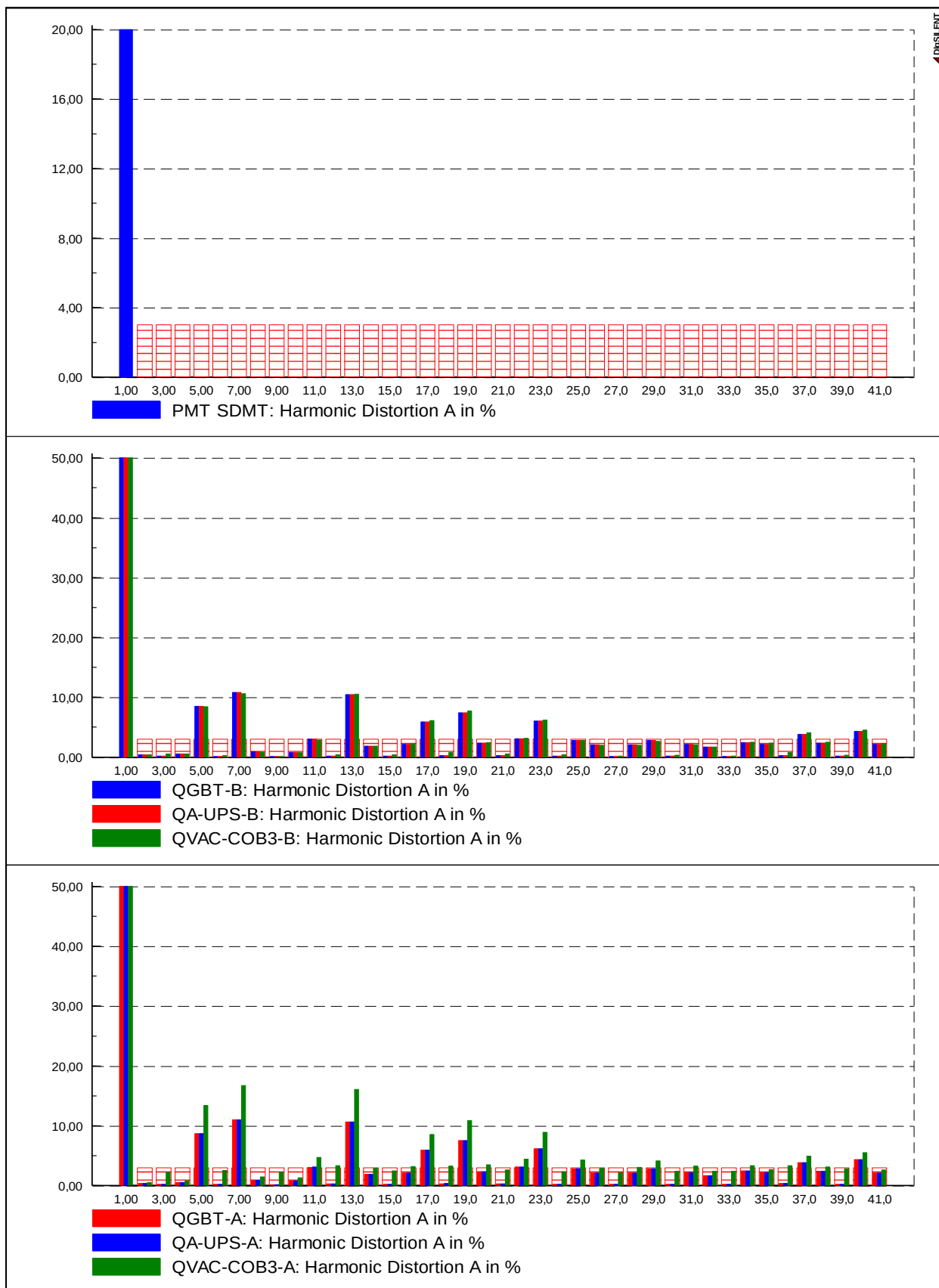


Figura A.5 : Espectro de tensão - Cenário 3
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

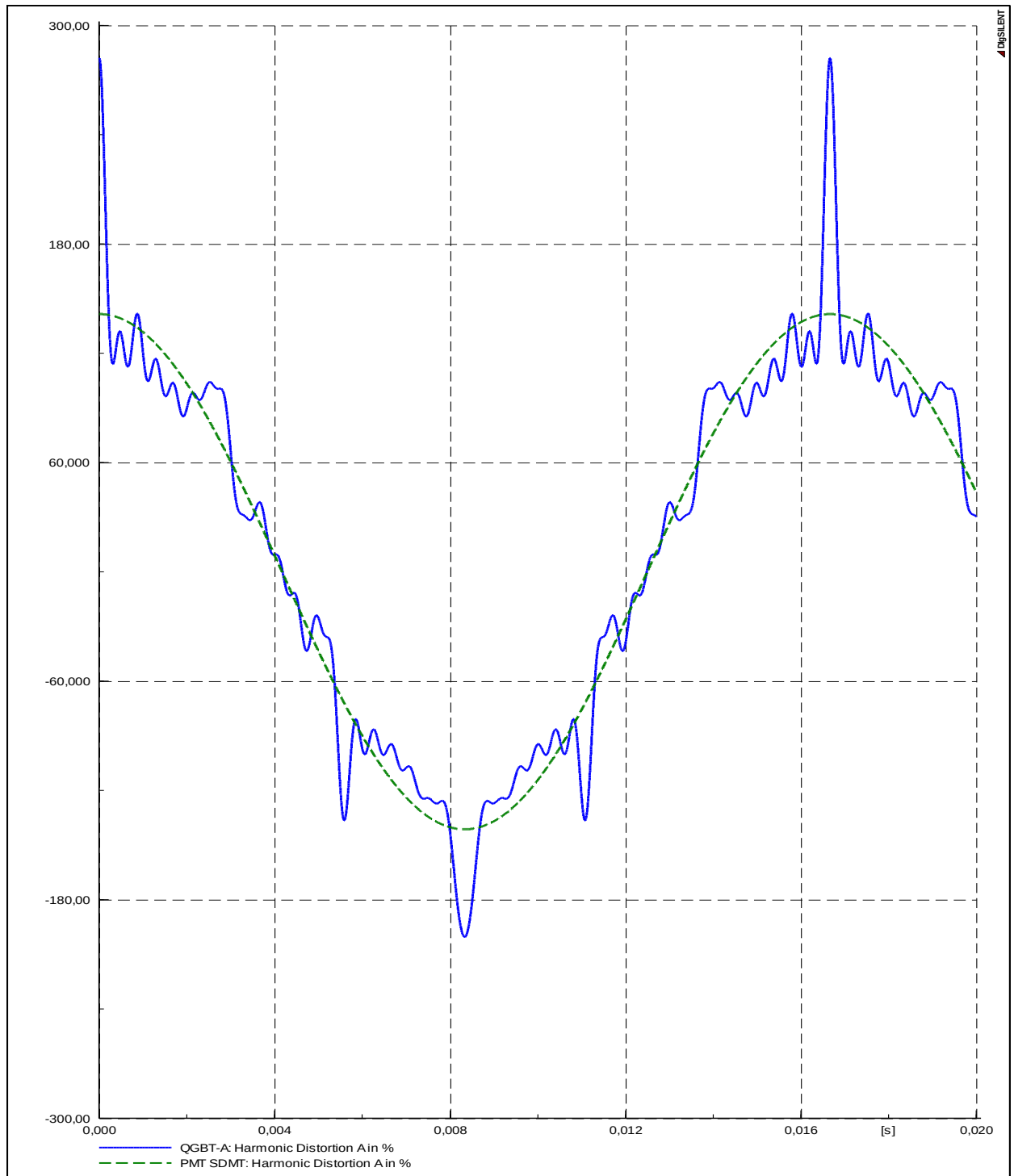


Figura A.6 : Forma de Onda de Tensão - Cenário 3
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 4

Tabela A.4 : Cenário 4
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
4	2ª	50%	50%	-	50%	50%	-	S	-	-	-	-

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores acima de 5% para as barras de BT do Lado A e Lado B. Notadamente as cargas do sistema de ar condicionado são responsáveis por estas distorções.

As barras de MT não apresentam valores elevados.

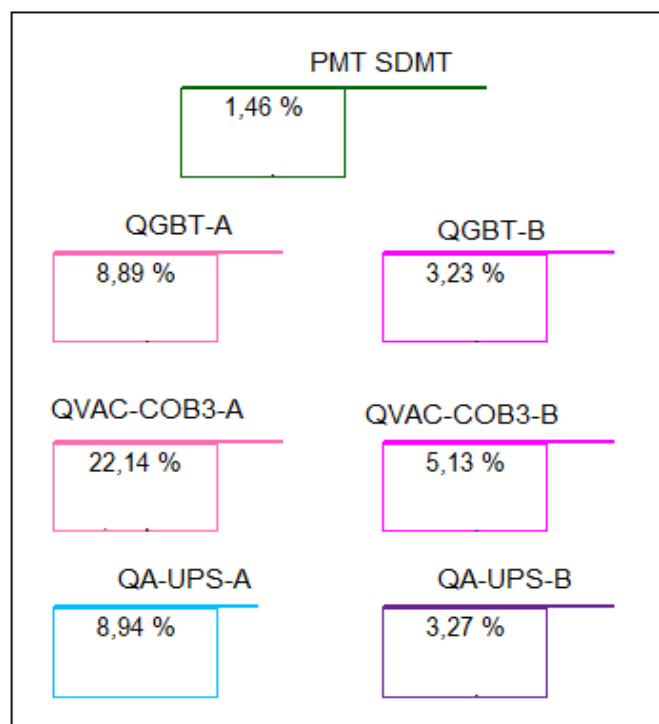


Figura A.7 : THDV'S - Cenário 4
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

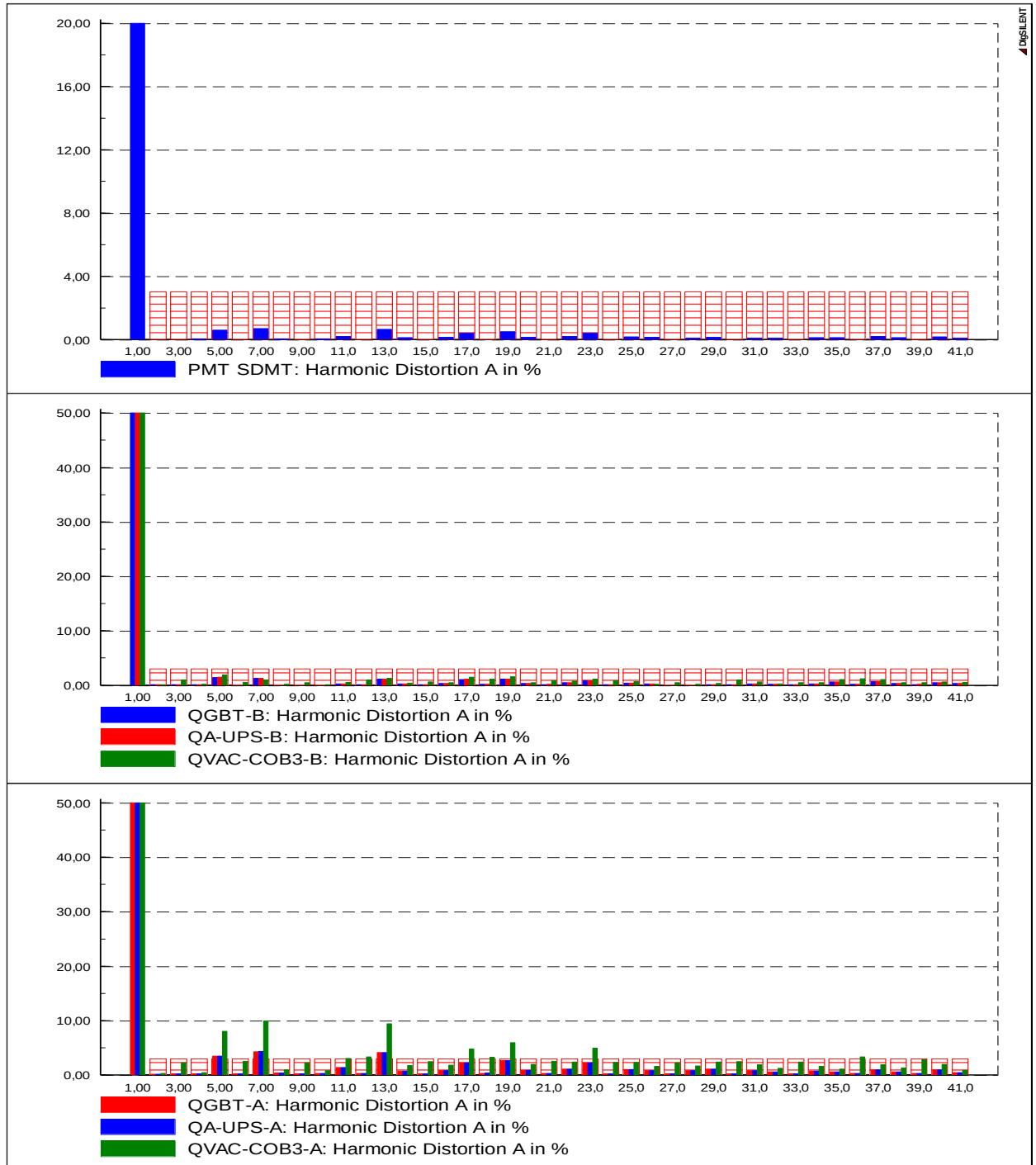


Figura A.8 : Espectro de tensão - Cenário 4
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

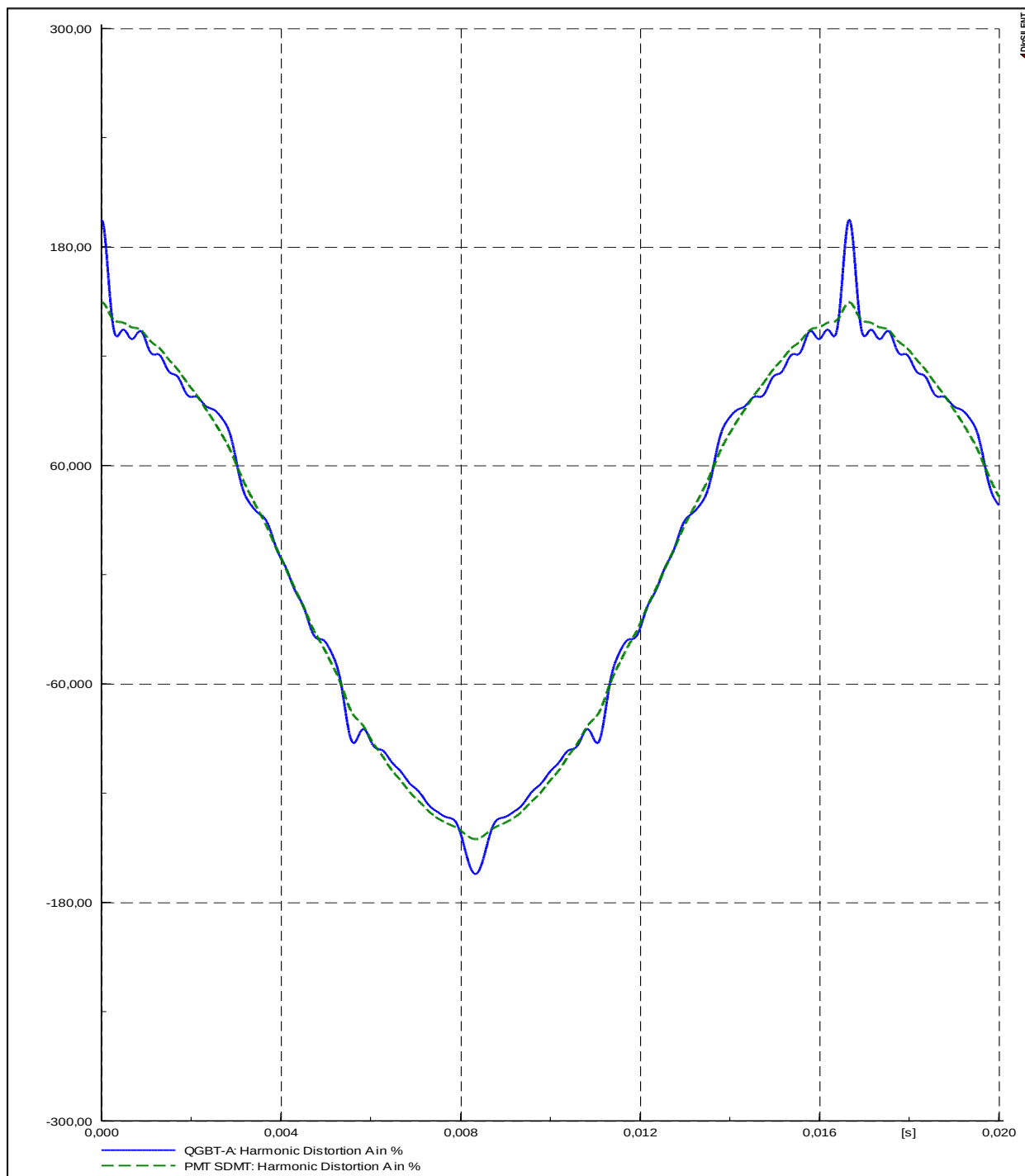


Figura A.9 : Forma de onda de tensão - Cenário 4
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 5

Tabela A.5 : Cenário 5
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
5	2ª	50%	50%	-	50%	50%	-	-	S	-	S	-

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores muito acima de 5% para as barras de BT. Neste caso, a troca da concessionária pelos geradores G1 e G3 diminui a capacidade de curto circuito do sistema fonte e consequentemente ocorre o aumento das distorções do sistema.

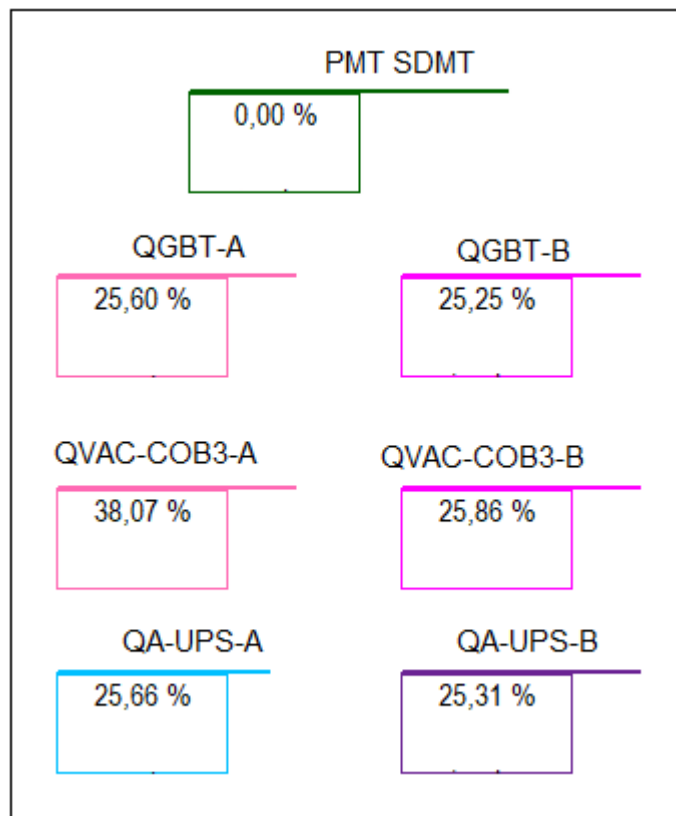


Figura A.10 : THDV'S - Cenário 5
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

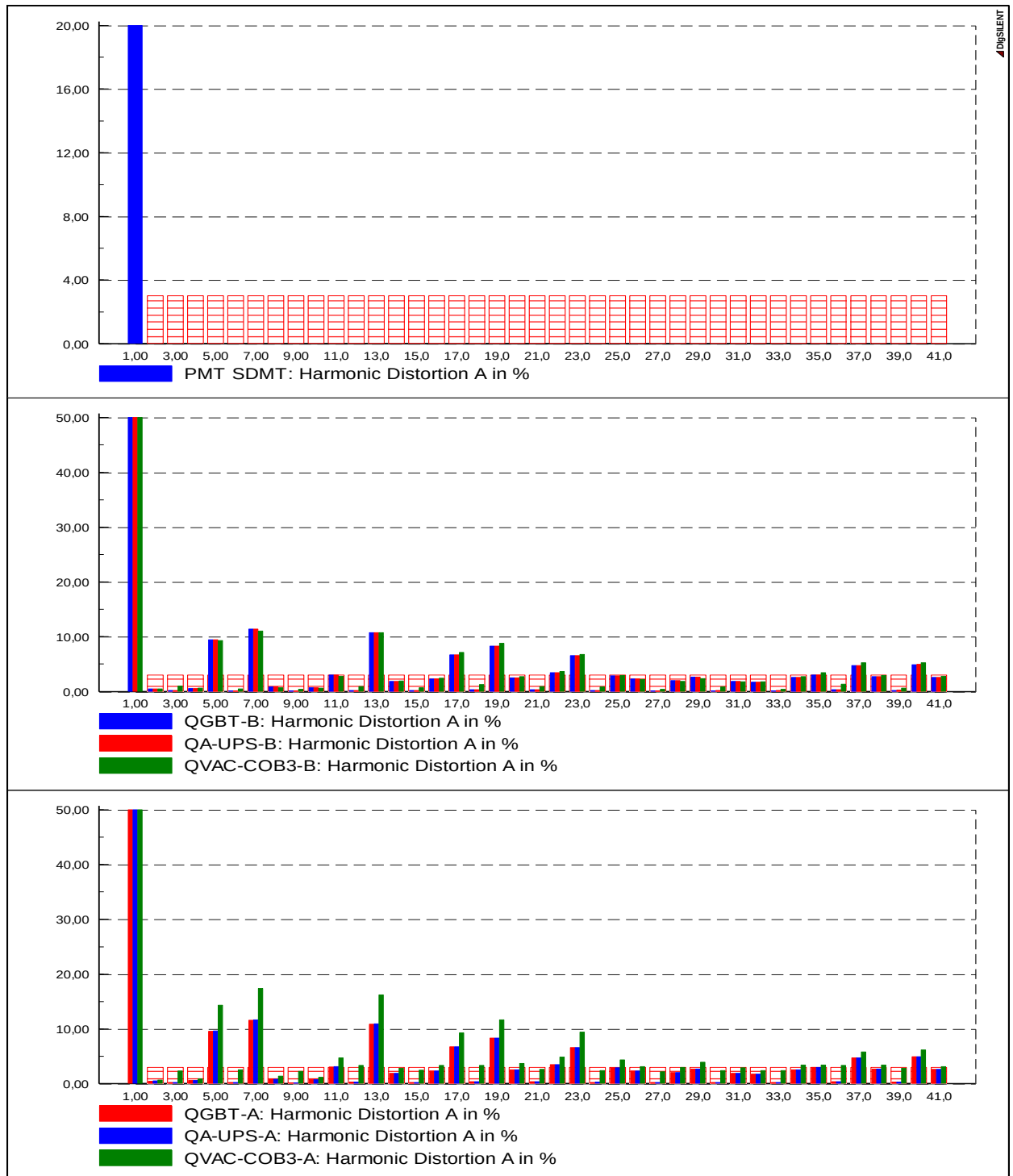


Figura A.11 : Espectro de tensão - Cenário 5
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

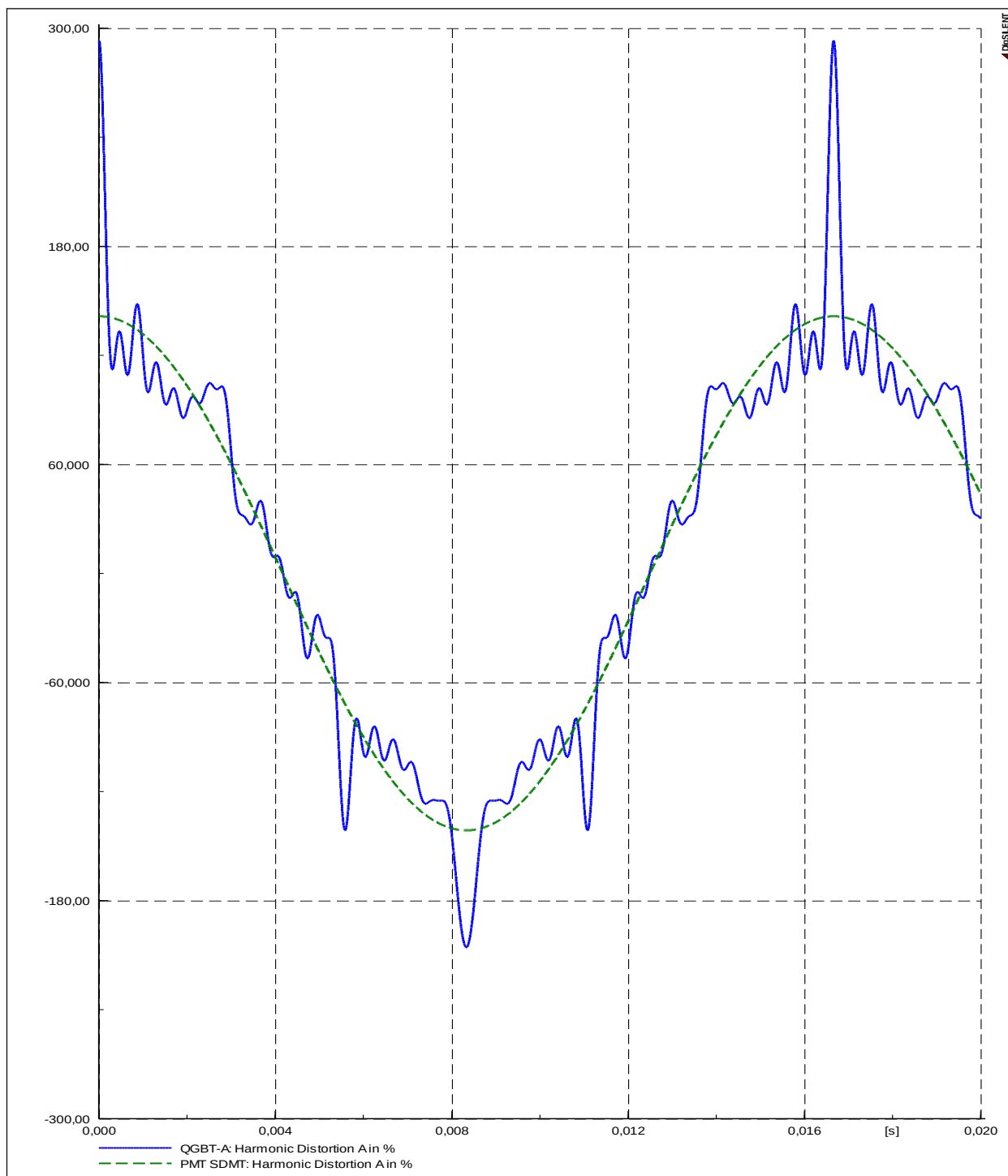


Figura A.12 : Forma de onda de tensão - Cenário 5
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 6

Tabela A.6 - Cenário 6
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
6	2ª	50%	50%	-	50%	50%	-	-	S	S	S	S

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores muito acima de 5% para as barras de BT. Neste caso, a troca da concessionária pelos geradores G1/2/3/4 diminui a capacidade de curto circuito do sistema fonte e consequentemente ocorre o aumento das distorções do sistema.

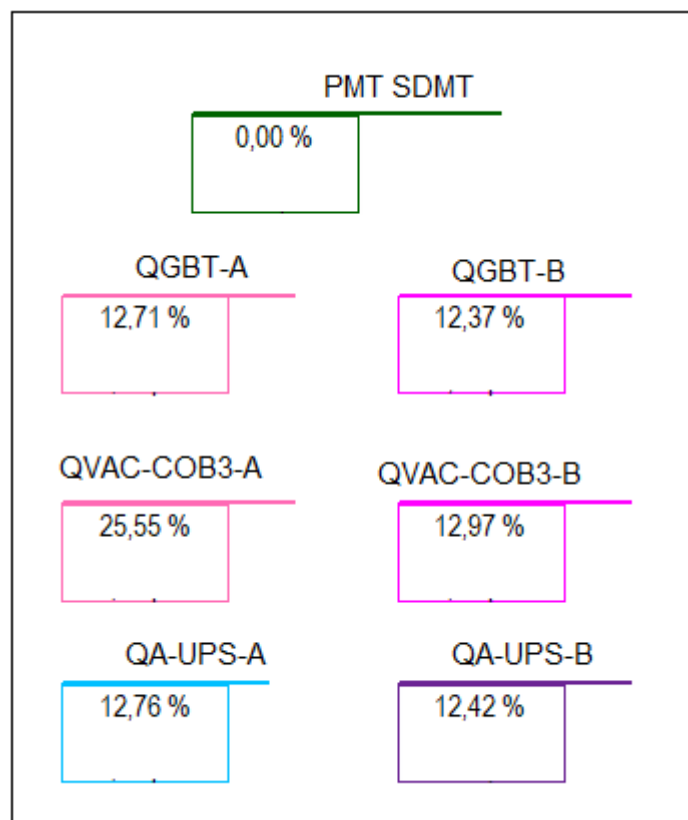


Figura A.13: THDV'S - Cenário 6
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

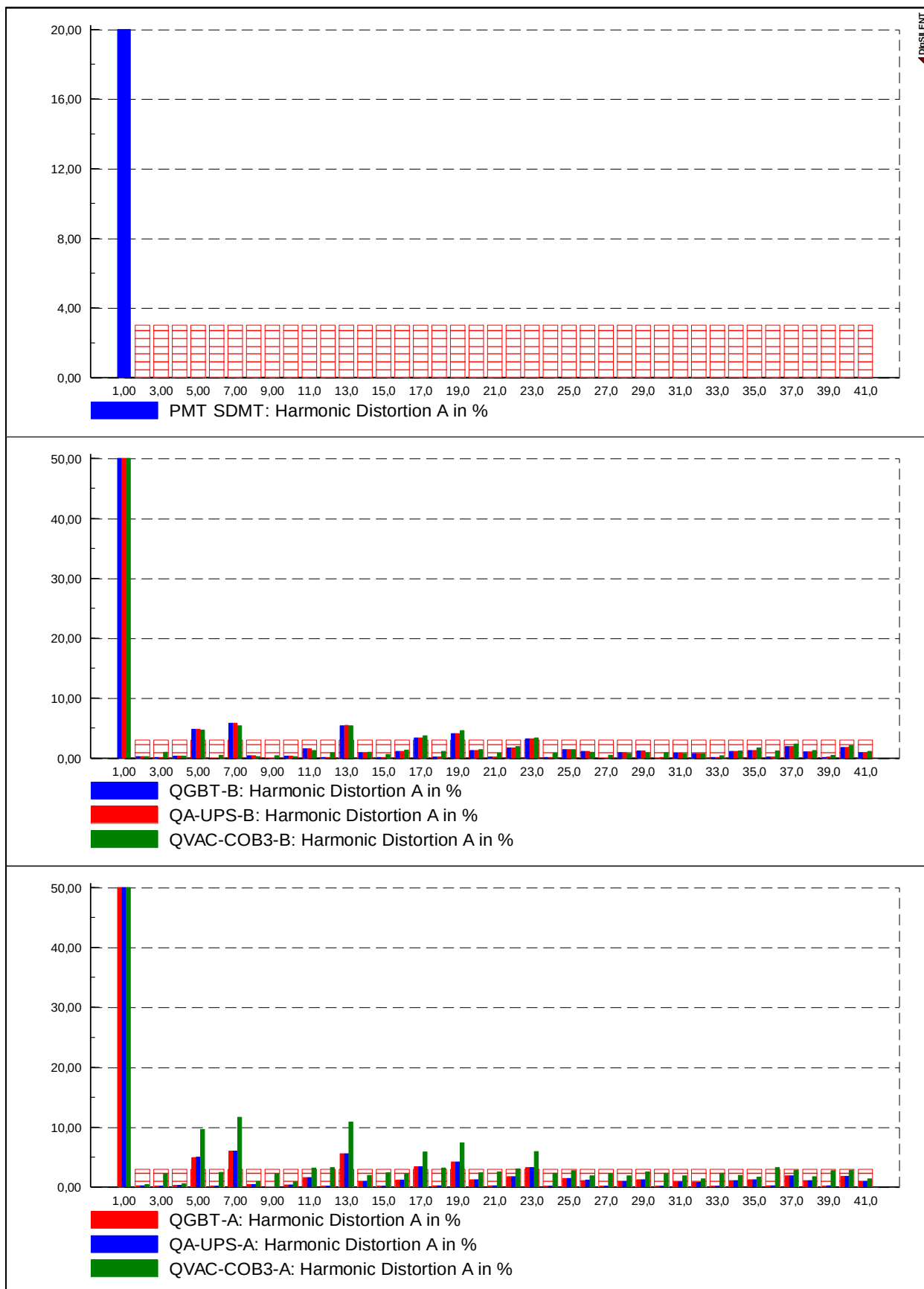


Figura A.14: Espectro de tensão - Cenário 6
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

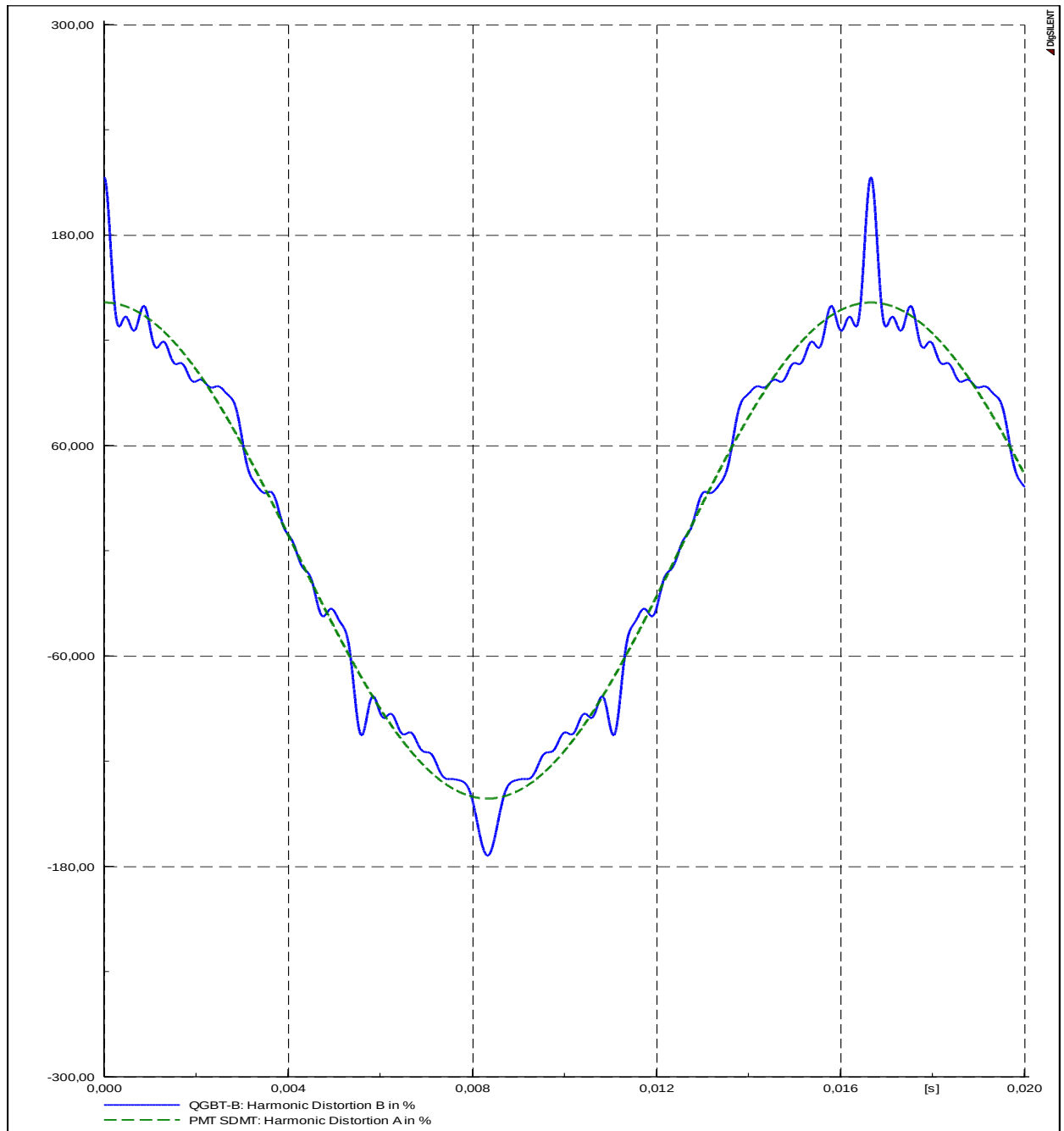


Figura A.15 - Forma de Onda - Cenário 6
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 7

Tabela A.7: Cenário 7
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
7	3ª	50%	50%	50%	50%	50%	50%	S	-	-	-	-

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores acima de 5% para as barras de BT dos Lados A e B mesmo com a presença da concessionária. Isto é explicado pelo aumento da potência das fontes harmônicas: UPSs e cargas de AC.

Para as barras de MT não foram calculados valores maiores que 5%.

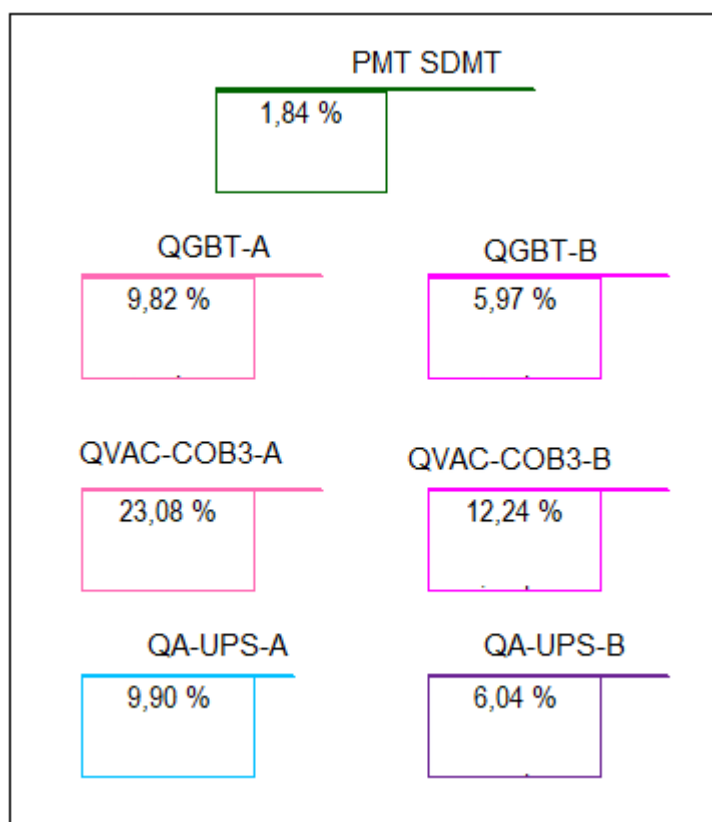


Figura A.16: THDV'S - Cenário 7
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

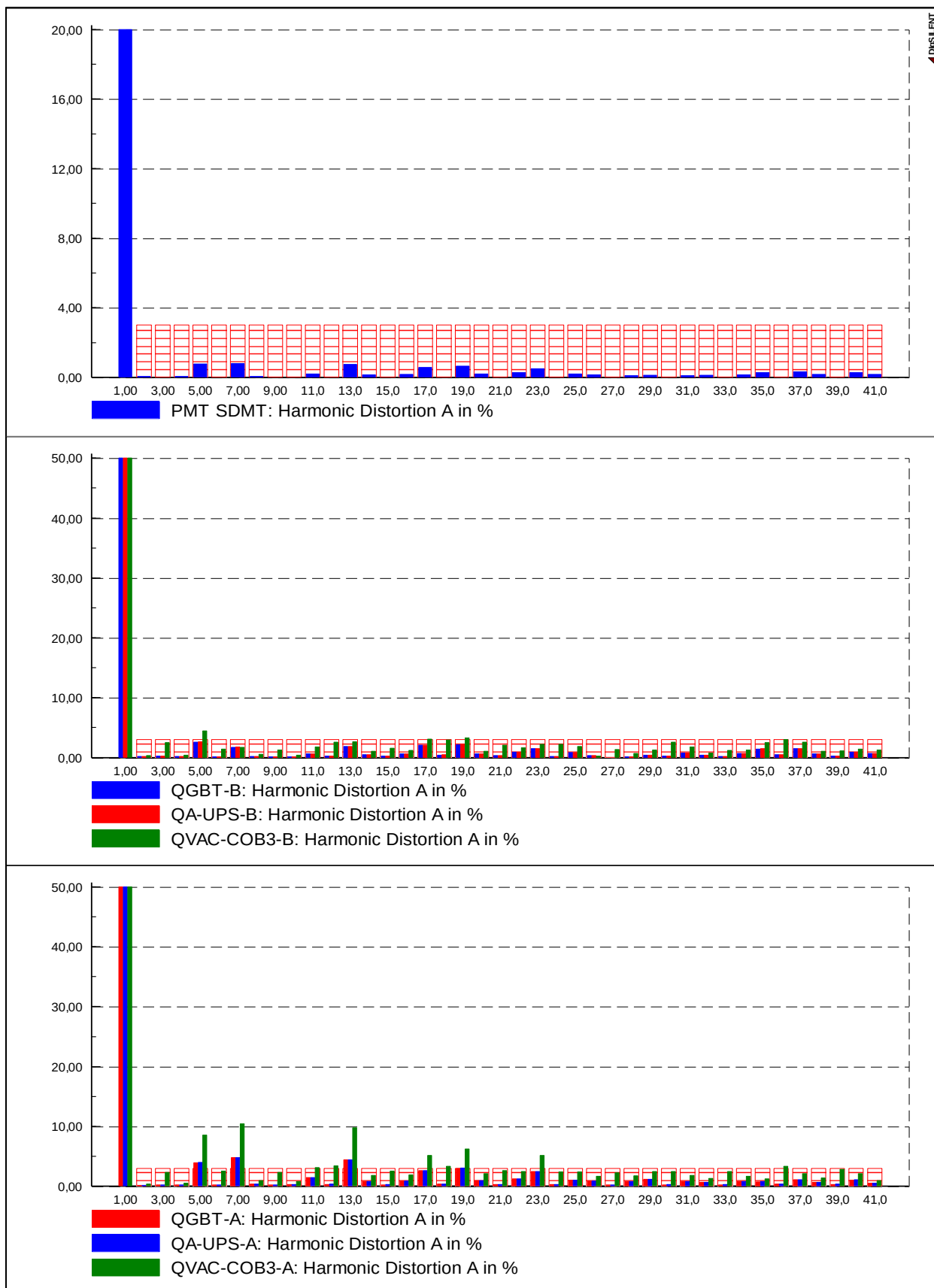


Figura A.17: Espectro de tensão - Cenário 7
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada. Consideramos os valores observados em situação limítrofe para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

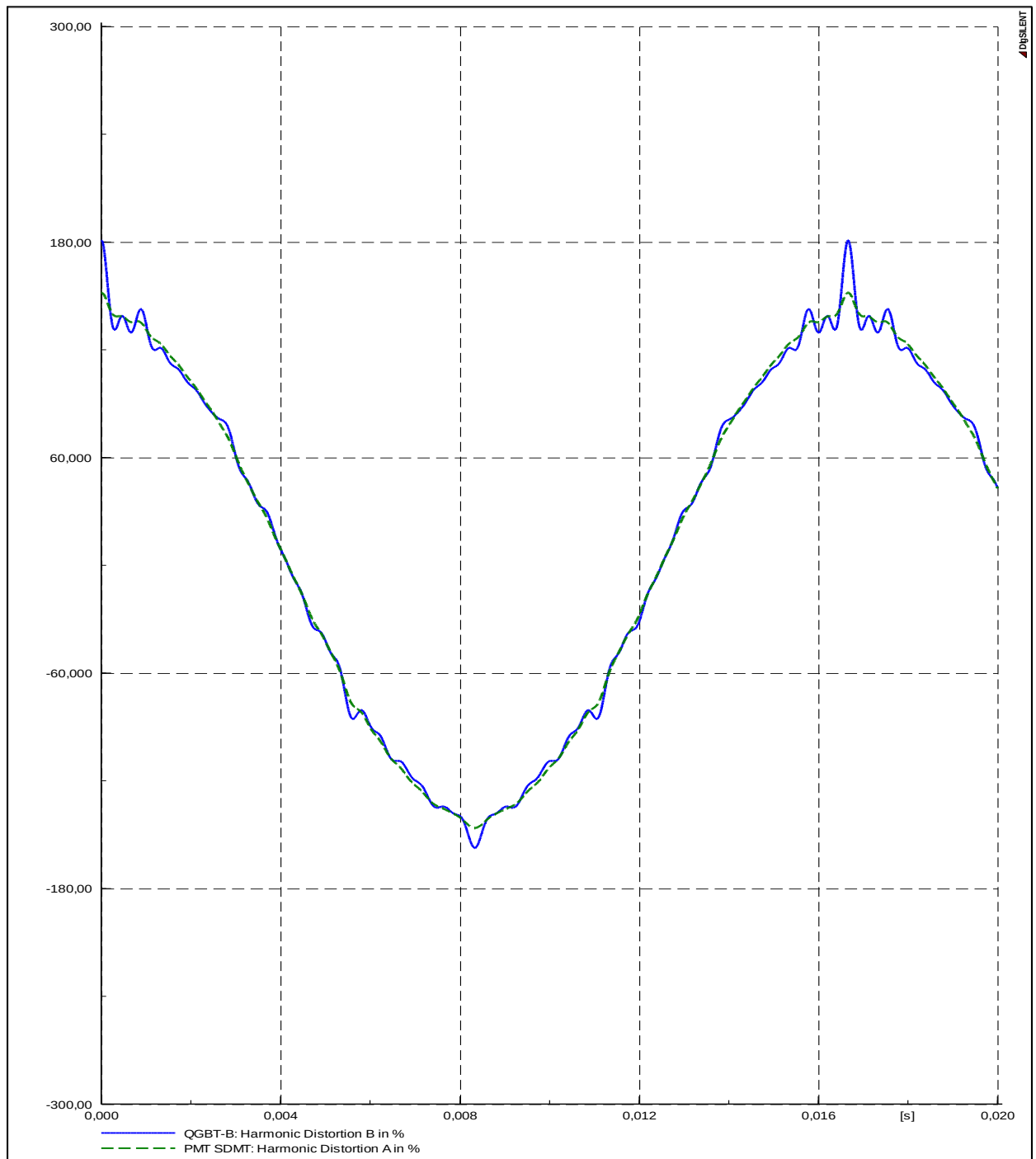


Figura A.18: Forma de onda de tensão - Cenário 7
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 8

Tabela A.8: Cenário 8
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
8	3ª	50%	50%	50%	50%	50%	50%	-	S	-	S	-

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores muito acima de 5% para as barras de BT. Neste caso, a troca da concessionária pelos geradores G1/3 diminui a capacidade de curto circuito do sistema fonte e conseqüentemente ocorre o aumento das distorções do sistema.

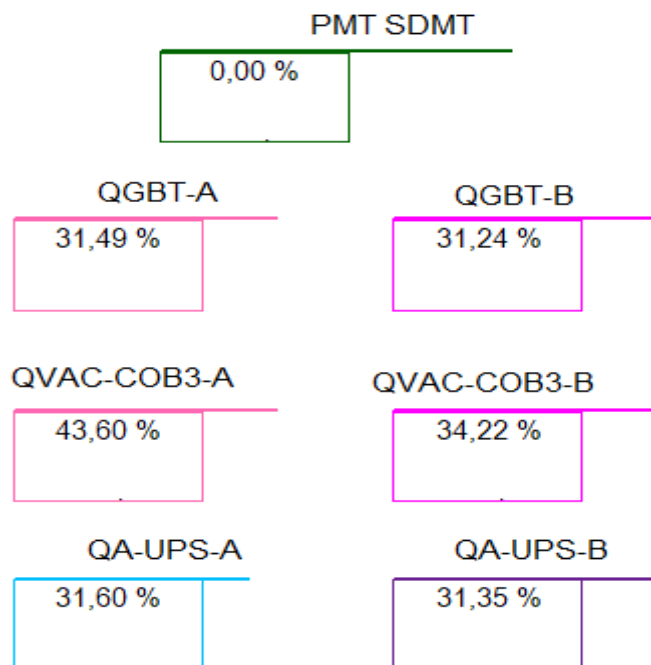


Figura A.19: THDV's Cenário 8
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

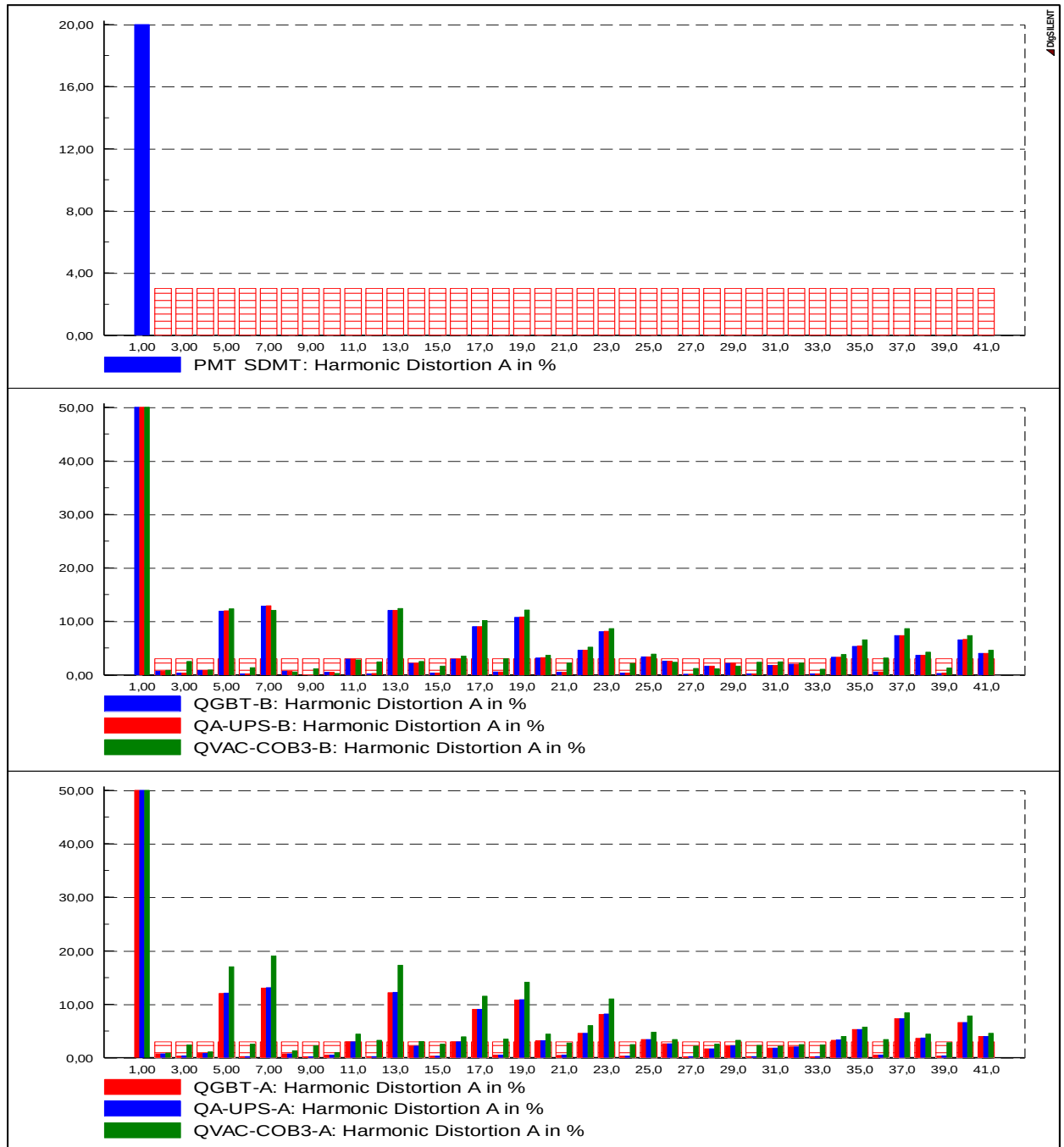


Figura A.20: Espectro de tensão - Cenário 8
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

As formas de onda apresentadas para as barras dos Lados A e B refletem a alta distorção observada. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.



Figura A.21: Forma de onda de tensão - Cenário 8
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário 9

Tabela A.9: Cenário 9
Fonte: GENNARI, 2016

Cenário	Fase	Carga das UPSs						Fonte em Operação				
		A3	A2	A1	B3	B2	B1	AES	G1	G2	G3	G4
9	3ª	50%	50%	50%	50%	50%	50%	-	S	S	S	S

Nas figuras das páginas a seguir são apresentados os resultados que estão comentados abaixo.

THDVs

Os THDVs calculados mostram valores muito acima de 5% para as barras de BT. Neste caso, a troca da concessionária pelos geradores G1/2/3/4 diminui a capacidade de curto circuito do sistema fonte e conseqüentemente ocorre o aumento das distorções do sistema.

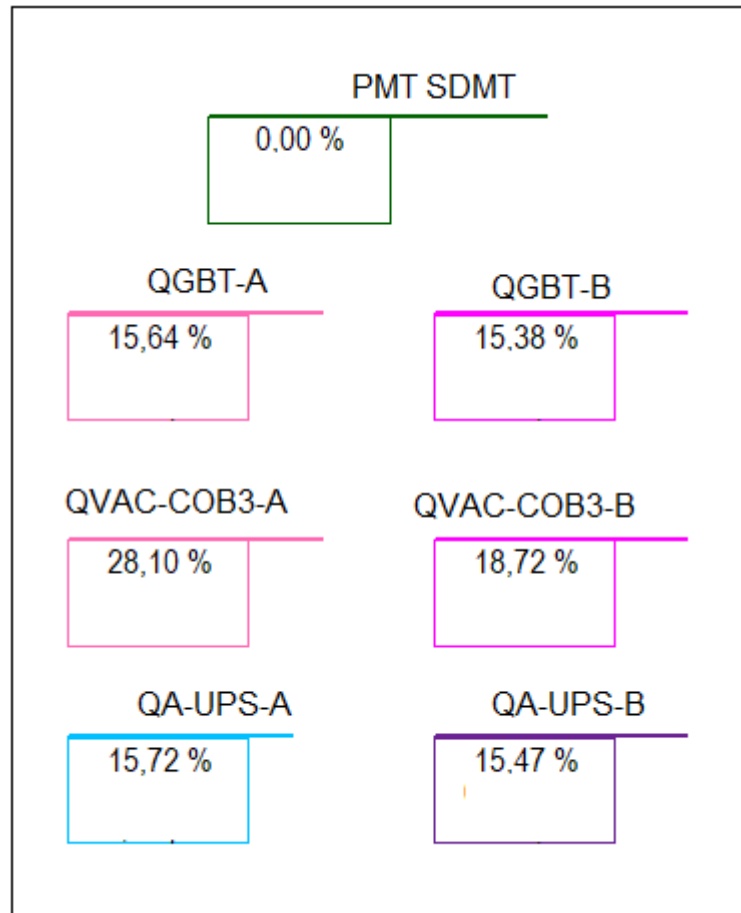


Figura A.22: THDV's Cenário 9
Fonte: GENNARI, 2016

Espectros de tensão

Os espectros de tensão para as barras de BT refletem os valores dos THDVs e mostram valores individuais para as ordens harmônicas muito maiores que o esperado para a norma (barras hachuradas vermelhas).

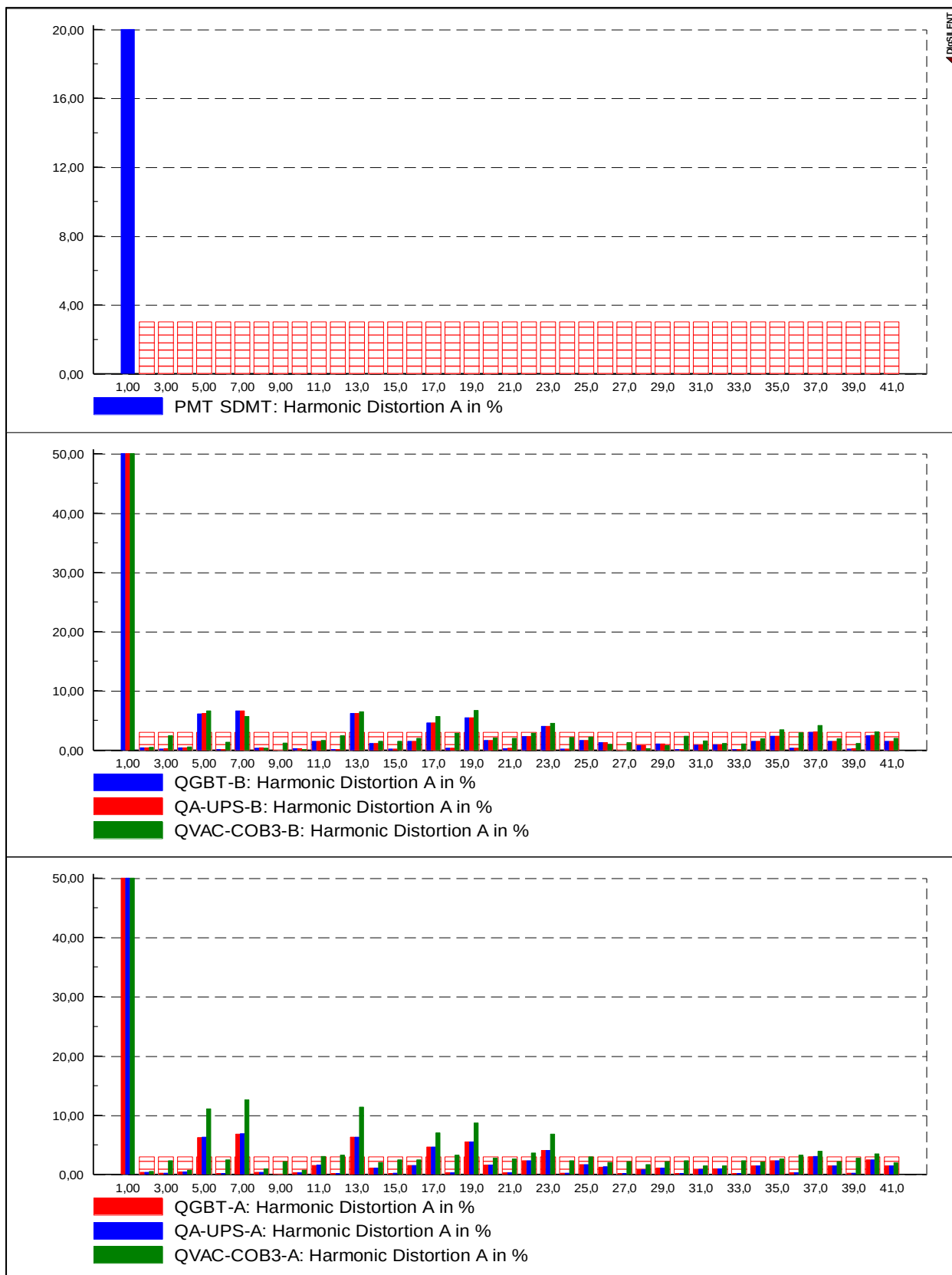


Figura A.23: Espectro de tensão - Cenário 9
Fonte: GENNARI, 2016

Forma de onda

A forma de onda apresentada para a barra do Lado A reflete a alta distorção observada. Consideramos os valores observados suficientes para interferir na regulação e sincronismo dos geradores em operação.

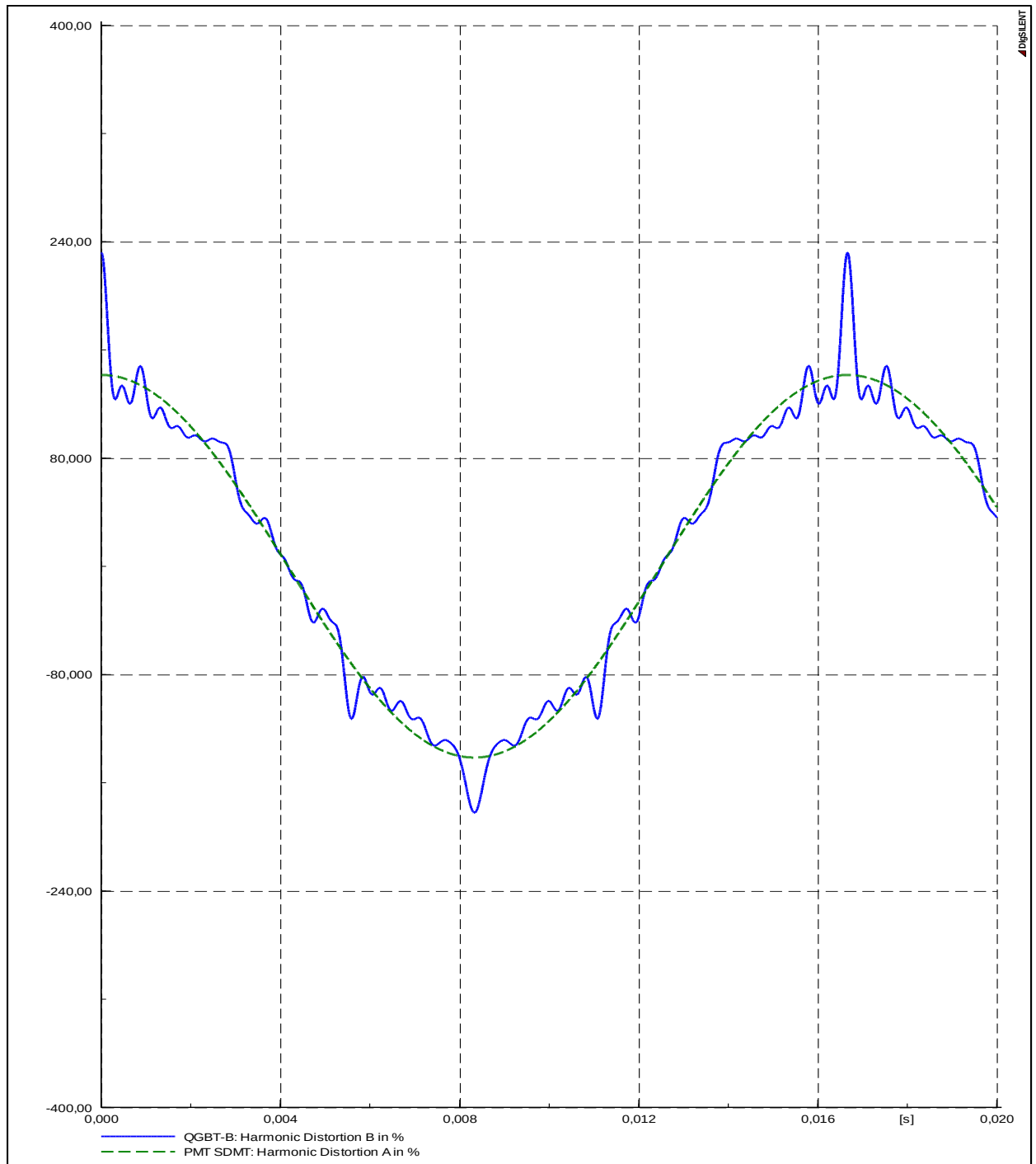


Figura A.24: Forma de onda de tensão - Cenário 9
Fonte: GENNARI, 2016