

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Diagnóstico de Distorções Harmônicas em um Sistema Elétrico Industrial

Daniel Junior de Oliveira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE, MG
2017

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica

Diagnóstico de Distorções Harmônicas em um Sistema Elétrico Industrial

Daniel Junior de Oliveira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho

João Monlevade, MG

2017

O482d Oliveira, Daniel Júnior de.
Diagnóstico de distorções harmônicas em um sistema elétrico industrial
[manuscrito] / Daniel Júnior de Oliveira. - 2017.

99f.: il.: color; grafs.

Orientador: Prof. Me. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de energia elétrica (Indústria). 3. Harmônicas - Análise. I. Baracho, Francisco Ricardo Abrantes Couy. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.3



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 16 dias do mês de fevereiro de 2017, às 19 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Daniel Junior de Oliveira, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Wilmington Guerra Zierovitz, Juan Carlos Galvois Moura e Francisco Ricardo A.C. Baracho.
O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: Análise de Distúrbios Harmônicos em Sistemas Elétricos Industriais. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do(a) candidato(a), com a nota média 8,0, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

| Banca Examinadora | Nota |
|---------------------------------------|------------|
| <u>Wilmington Guerra Zierovitz</u> | <u>8,0</u> |
| <u>Juan Carlos Galvois Moura</u> | <u>8,0</u> |
| <u>Francisco Ricardo A.C. Baracho</u> | <u>8,0</u> |
| Média | 8,0 |

João Monlevade, 16 de fevereiro de 2017.

Francisco Ricardo A.C. Baracho Daniel Junior de Oliveira

Professor(a) Orientador(a)

Aluno (a)

Juan Carlos Galvois M.

Wilmington Guerra Z.

Professor(a) Convidado(a)

Professor(a) Convidado(a)



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Análise de Distorções Harmônicas em Sistemas Elétricos Industriais" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 20 de janeiro de 2017.

Daniel Júnior de Oliveira
Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada teria acontecido.

Agradeço também aos meus pais José das Graças e Maria das Graças, e a minha irmã Silvia que me apoiaram nesta caminhada, cada um contribuindo de forma indispensável para que este dia chegasse.

Agradeço ao meu irmão Vinícius que iniciou a jornada comigo e mesmo tendo que parar os estudos para lutar pela sua vida nunca deixou de me apoiar durante todo o curso. E o mais importante, agora ele está de volta pela honra e glória do Pai para vivermos juntos este momento.

Aos meus amigos da graduação Thiago Martins, Miguel, Hugo, João Paulo, Paulo César, Talysson, Rafael e tantos outros que lutaram juntos comigo contribuindo muito para o meu aprendizado durante as trocas de experiências para alcançarmos no fim o mesmo objetivo.

À minha esposa Valdênia que esteve comigo desde o vestibular e acreditou que este dia chegaria até mesmo quando eu não mais acreditava.

Ao meu orientador, o Prof. Francisco Baracho, e o Prof. Juan Carlos Galvis Manso por todas as contribuições ao longo do trabalho.

Resumo

Neste trabalho é feito o diagnóstico das distorções harmônicas em uma planta industrial de grande porte, especificamente na indústria metalúrgica. É feita a descrição das principais fontes geradoras de harmônicos, sendo elas os conversores, sistemas de iluminação e fornos a arco elétrico. São apresentadas as normas e limites vigentes, assim como os indicadores de distorção harmônica de tensão e corrente. Por último, são apresentados os resultados e as conclusões obtidas com as medições realizadas nos diversos equipamentos e a comparação destes resultados com os valores de referência para distorção harmônica.

Palavras chave: Harmônicos, Sistemas Elétricos Industriais.

Abstract

In this paper is done a diagnosis of harmonic distortion in an Industrial Electrical System, specifically in the metal industry. A description of the main sources of harmonics is performed, they are converters, lighting systems and electric arc furnaces. The ongoing limits and standards are presented, as well the indicators of current and voltage harmonic distortion. Finally, are presented the results and conclusions obtained with the measurements made in the different equipments and the comparison of these results with the reference values for harmonic distortion.

Keywords: Harmonics, Industrial Electrical Systems.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Comportamento de uma Carga Não-Linear | 4 |
| Figura 2 – Representação da Série de Fourier de uma Onda Distorcida | 5 |
| Figura 3 – Analisador de Energia 8335 | 12 |
| Figura 4 – Componentes Harmônicas (a)Derretimento (b)Refinamento | 14 |
| Figura 5 – Circuito do Reator | 15 |
| Figura 6 – Retificador Controlado de 6 Pulsos | 16 |
| Figura 7 – Retificador Controlado de 12 Pulsos | 17 |
| Figura 8 – Conversor CA-CA com By-Pass | 18 |
| Figura 9 – Conversor CC-CA de Tensão Constante | 19 |
| Figura 10 – Conversor CC-CA de Corrente Constante | 19 |
| Figura 11 – Conversor CC-CA de 3 Níveis | 20 |
| Figura 12 – (a)Flicker Randômico (b)Flicker Senoidal | 22 |
| Figura 13 – Simulação Completa | 22 |
| Figura 14 – Parâmetros da Simulação | 23 |
| Figura 15 – Tensão e Corrente no Arco para o Modelo Hiperbólico (a)Flicker Senoidal (b)Flicker Randômico | 24 |
| Figura 16 – Tensão e Corrente no Arco para o Modelo Exponencial (a)Flicker Senoidal (b)Flicker Randômico | 25 |
| Figura 17 – Tensão e Corrente no Arco para o Modelo Combinado (a)Flicker Senoidal (b)Flicker Randômico | 26 |
| Figura 18 – Equação Térmica do Arco | 28 |
| Figura 19 – Equação de Potência Irradiada | 28 |
| Figura 20 – Equação de Potência Dissipada por Condução | 29 |
| Figura 21 – Equação da Resistência da Coluna do Arco | 29 |
| Figura 22 – Modelo do Arco na Lâmpada de Descarga | 29 |
| Figura 23 – Modelo Lâmpada-Reator | 30 |
| Figura 24 – Tensão no arco - Lâmpada de Vapor de Mercúrio 80W | 30 |
| Figura 25 – Corrente no arco - Lâmpada de Vapor de Mercúrio 80W | 31 |
| Figura 26 – Conversor CA-CC <i>SIMULINK</i> ® | 32 |
| Figura 27 – Tensão do Conversor CA-CC Simulado | 33 |
| Figura 28 – Corrente do Conversor CA-CC Simulado | 33 |
| Figura 29 – DHI de (a)Tensão e (b)Corrente do Conversor CA-CC Simulado | 34 |
| Figura 30 – Conversor CA-CA <i>SIMULINK</i> ® | 35 |
| Figura 31 – Tensão do Conversor CA-CA Simulado | 35 |
| Figura 32 – Corrente do Conversor CA-CA Simulado | 36 |
| Figura 33 – DHI de Tensão para o Ângulo de (a)90° e (b)5° | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 – DHI de Corrente para o Ângulo de (a)90° e (b)5° | 38 |
| Figura 35 – Conversor CC-CA <i>SIMULINK</i> ® | 39 |
| Figura 36 – Tensão do Conversor CC-CA Simulado | 40 |
| Figura 37 – Corrente do Conversor CC-CA Simulado | 40 |
| Figura 38 – DHI de (a)Tensão e (b)Corrente do Conversor CC-CA Simulado | 41 |
| Figura 39 – Diagrama Unifilar da Alimentação do Forno a Arco | 42 |
| Figura 40 – Reator e Transformador do Forno a Arco | 43 |
| Figura 41 – Eletrodos do Forno a Arco | 43 |
| Figura 42 – Corrente RMS Gravada - Forno a Arco | 44 |
| Figura 43 – DHT de Corrente Gravada - Forno a Arco | 45 |
| Figura 44 – DHT de Tensão Gravada - Forno a Arco | 46 |
| Figura 45 – Diagrama Unifilar da Alimentação da Iluminação | 47 |
| Figura 46 – Quadro de Distribuição de Cargas | 48 |
| Figura 47 – Distribuição Física de Lâmpadas | 49 |
| Figura 48 – Corrente RMS Gravada - Iluminação | 50 |
| Figura 49 – Tensão RMS Gravada - Iluminação | 51 |
| Figura 50 – DHT de Corrente Gravada - Iluminação | 52 |
| Figura 51 – DHI de Corrente Instantânea - Iluminação | 52 |
| Figura 52 – DHT de Tensão Gravada - Iluminação | 53 |
| Figura 53 – DHI de Tensão Instantânea - Iluminação | 54 |
| Figura 54 – Diagrama Unifilar Conversores -Laminação | 55 |
| Figura 55 – Diagrama Unifilar Conversores -Utilidades | 56 |
| Figura 56 – Conversor CA-CC MAG-V | 57 |
| Figura 57 – Eletroímãs | 57 |
| Figura 58 – Tensão RMS Instantânea - CA-CC não controlado | 58 |
| Figura 59 – Corrente RMS Instantânea - CA-CC não controlado | 59 |
| Figura 60 – DHI de Tensão Instantânea - CA-CC não controlado | 60 |
| Figura 61 – DHI de Corrente Instantânea - CA-CC não controlado | 60 |
| Figura 62 – DHT de Corrente Gravada - CA-CC não controlado | 61 |
| Figura 63 – DHT de Tensão Gravada - CA-CC não controlado | 62 |
| Figura 64 – Conversor CA-CC Tyrak | 63 |
| Figura 65 – Motor de Corrente Contínua | 63 |
| Figura 66 – Corrente RMS Gravada - CA-CC controlado | 65 |
| Figura 67 – Tensão RMS Gravada - CA-CC controlado | 65 |
| Figura 68 – DHT de Corrente Gravada - CA-CC controlado | 66 |
| Figura 69 – DHT de Tensão Gravada - CA-CC controlado | 67 |
| Figura 70 – Conversor CA-CA Sikostart | 67 |
| Figura 71 – Motor de Indução 250CV | 68 |
| Figura 72 – Corrente RMS Gravada - CA-CA | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 73 – Tensão RMS Gravada - CA-CA | 69 |
| Figura 74 – DHT de Corrente Gravada - CA-CA | 70 |
| Figura 75 – DHT de Tensão Gravada - CA-CA | 71 |
| Figura 76 – Tensão(a) e Corrente(b) RMS de Partida para Três Instantes | 72 |
| Figura 77 – Conversor CC-CA Micromaster 430 | 73 |
| Figura 78 – Estrutura do controlador PID - Micromaster 430 | 74 |
| Figura 79 – Corrente RMS Gravada - CC-CA de um Nível | 75 |
| Figura 80 – DHT de Corrente Gravada - CC-CA de um Nível | 76 |
| Figura 81 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA de um Nível | 77 |
| Figura 82 – Tensão RMS Gravada - CC-CA de um Nível | 78 |
| Figura 83 – DHI de Tensão Instantânea - CC-CA de um Nível | 79 |
| Figura 84 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA de um Nível | 80 |
| Figura 85 – Tensão RMS Instantânea -sem reator - CC-CA de um Nível | 81 |
| Figura 86 – Tensão RMS Instantânea -com reator - CC-CA de um Nível | 81 |
| Figura 87 – Conversor CC-CA Drive G7 | 82 |
| Figura 88 – Motores do Trem de Rolo | 82 |
| Figura 89 – Corrente RMS Gravada - CC-CA Multinível | 83 |
| Figura 90 – DHT de Corrente Gravada - CC-CA Multinível | 84 |
| Figura 91 – Corrente RMS Instantânea - CC-CA Multinível | 85 |
| Figura 92 – Tensão RMS Gravada - CC-CA Multinível | 85 |
| Figura 93 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA Multinível | 87 |
| Figura 94 – Tensão RMS Instantânea - CC-CA Multinível | 87 |
| Figura 95 – Corrente RMS Gravada | 88 |
| Figura 96 – DHT de Corrente Gravada - CC-CA Multinível | 89 |
| Figura 97 – Corrente RMS Instantânea - CC-CA Multinível | 89 |
| Figura 98 – Tensão RMS Gravada - CC-CA Multinível | 90 |
| Figura 99 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA Multinível | 91 |
| Figura 100 – Tensão RMS Instantânea - CC-CA Multinível | 91 |
| Figura 101 – (a)Tensão Medida e Simulada (b)Corrente Medida e Simulada para o Forno | 93 |
| Figura 102 – (a)DHI de Corrente Medida (b)DHI de Corrente Simulada para a Iluminação | 94 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Limites Globais de Tensão | 7 |
| Tabela 2 – Limites Individuais de Tensão | 7 |
| Tabela 3 – Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais | 8 |
| Tabela 4 – Limites de Correntes Harmônicas para Equipamentos Classes A,B,C e D | 9 |
| Tabela 5 – Limites de Distorções Harmônicas para Média e Alta Tensão | 10 |
| Tabela 6 – Mínima Atenuação Requerida | 12 |
| Tabela 7 – Especificações PowerPad 8335 | 13 |
| Tabela 8 – Conteúdo Harmônico de um Forno a Arco (%) | 15 |
| Tabela 9 – Conteúdo Harmônico de Conversores CA-CC de 6 e 12 Pulsos | 17 |
| Tabela 10 – Distribuição de Lâmpadas | 48 |
| Tabela 11 – Resumo do Resultado dos Conversores | 96 |

Lista de abreviaturas

| | |
|-------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| AT | Alta Tensão |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| DHI | Distorção Harmônica Individual |
| DHT | Distorção Harmônica Total |
| DIT | Distorção Harmônica Individual de Tensão |
| DTD | Distorção Total da Demanda |
| FIT | Fator de Interferência Telefônica |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineer |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| MT | Média Tensão |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| RMS | Root Mean Square |
| SCR | Silicon Control Rectifier |
| SPWM | Sinusoidal Pulse Width Modulation |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Motivação | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 1 |
| 1.3 | Revisão Bibliográfica | 2 |
| 1.3.1 | Histórico dos Harmônicos | 2 |
| 1.3.1.1 | Os Primórdios dos Harmônicos no Sistema Elétrico | 2 |
| 1.3.1.2 | Os Harmônicos e a Evolução da Indústria | 3 |
| 1.3.2 | Distorção Harmônica | 3 |
| 1.3.3 | Índices Harmônicos | 5 |
| 1.3.3.1 | Distorção Harmônica Total | 5 |
| 1.3.3.2 | Distorção Total da Demanda | 6 |
| 1.3.4 | Normas e Procedimentos | 7 |
| 1.3.4.1 | Procedimento de Rede - Submódulo 2.8 | 7 |
| 1.3.4.2 | PRODIST | 7 |
| 1.3.4.3 | IEEE Std 519-1992 | 8 |
| 1.3.4.4 | IEC 61000 | 8 |
| 2 | MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS | 11 |
| 2.1 | Metodologia | 11 |
| 2.2 | Equipamento de Medição | 11 |
| 2.2.1 | Pré-requisitos | 11 |
| 2.2.2 | Analisador de Energia 8335 | 12 |
| 3 | FONTES DE HARMÔNICOS | 14 |
| 3.1 | Forno a Arco Elétrico | 14 |
| 3.2 | Iluminação | 15 |
| 3.3 | Conversores | 16 |
| 3.3.1 | CA-CC | 16 |
| 3.3.2 | CA-CA | 17 |
| 3.3.3 | CC-CA | 19 |
| 4 | MODELOS COMPUTACIONAIS | 21 |
| 4.1 | Forno a Arco Elétrico | 21 |
| 4.2 | Iluminação | 26 |
| 4.3 | Conversores | 31 |
| 4.3.1 | CA-CC | 31 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.3.2 | CA-CA | 34 |
| 4.3.3 | CC-CA | 38 |
| 5 | RESULTADOS | 42 |
| 5.1 | Forno a Arco Elétrico | 42 |
| 5.1.1 | Regime de Operação | 43 |
| 5.1.2 | Resultados | 44 |
| 5.2 | Iluminação | 47 |
| 5.2.1 | Regime de Operação | 49 |
| 5.2.2 | Resultados | 50 |
| 5.3 | Conversores | 55 |
| 5.3.1 | CA-CC | 56 |
| 5.3.1.1 | CA-CC em Onda Completa | 56 |
| 5.3.1.1.1 | Regime de Operação | 57 |
| 5.3.1.1.2 | Resultados | 58 |
| 5.3.1.2 | CA-CC Controlado | 62 |
| 5.3.1.2.1 | Regime de Operação | 64 |
| 5.3.1.2.2 | Resultados | 64 |
| 5.3.2 | CA-CA | 67 |
| 5.3.2.1 | Regime de Operação | 68 |
| 5.3.2.2 | Resultados | 68 |
| 5.3.3 | CC-CA | 73 |
| 5.3.3.1 | Conversor CC-CA de um Nível | 73 |
| 5.3.3.1.1 | Regime de Operação | 74 |
| 5.3.3.1.2 | Resultados | 75 |
| 5.3.3.2 | Conversor CC-CA Multinível | 82 |
| 5.3.3.2.1 | Regime de Operação | 82 |
| 5.3.3.2.2 | Resultados | 83 |
| 6 | COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES | 93 |
| 6.1 | Forno a Arco | 93 |
| 6.2 | Iluminação | 93 |
| 6.3 | Conversores | 94 |
| 6.3.1 | CA-CC | 94 |
| 6.3.2 | CA-CA | 95 |
| 6.3.3 | CC-CA | 95 |
| 6.3.4 | Resumo dos Resultados dos Conversores | 95 |
| 7 | CONCLUSÕES | 97 |
| | REFERÊNCIAS | 98 |

1 Introdução

A utilização de equipamentos com dispositivos de estado sólido é cada vez mais frequente na indústria. Estes dispositivos são encontrados em conversores estáticos para controle de velocidade de máquinas rotativas, retificadores e em equipamentos de acionamento de fornos à arco voltaico utilizados em usinas siderúrgicas. Apesar do eficiente controle de fluxo de energia, o uso destes equipamentos acarreta a distorção da corrente e tensão da rede, sendo esse fenômeno conhecido como distorção harmônica. Tal distorção causa diversos efeitos indesejados em vários dispositivos existentes em uma planta industrial, sendo alguns deles: o aumento de temperatura dos cabos, diminuição de vida útil, acionamentos indevidos causados por múltiplas passagens por zero em dispositivos de controle, erros de medição e, além de tudo, o aumento de perdas com a maior circulação de energia reativa (DUGAN, 2002).

Neste trabalho, são analisadas diversas fontes geradoras de harmônicos em sistemas elétricos industriais. Um estudo prático sobre alguns tipos de cargas não lineares, bem como um estudo sobre os índices e limites que regem a análise de harmônicos são feitos.

1.1 Motivação

Um nível inadequado de distorção harmônica pode vir a causar problemas nos demais equipamentos da planta industrial, como afetar o desempenho de computadores, sistemas telefônicos e outros equipamentos eletrônicos que sejam sensíveis à interferência dos harmônicos. Um outro efeito da alta taxa de distorção harmônica é um consequente baixo fator de potência, pois as componentes harmônicas contribuem para o aumento da corrente eficaz, aumentando a potência aparente sem produzir potência ativa. Dessa forma, o estudo dos harmônicos se torna fundamental, visto a busca cada vez maior de economia de recursos, controle de demanda e regulação de tensão do sistema elétrico industrial (DIAS, 2002).

1.2 Objetivos

O objetivo geral é realizar o diagnóstico das distorções harmônicas em uma planta industrial de grande porte, mostrando qual efeito cada tipo de equipamento gera na rede elétrica.

Os objetivos específicos são:

- i. Realizar medições de harmônicos em cargas industriais através do analisador de qualidade de energia;

- ii. Gerar graficamente os resultados do monitoramento através do *software* do analisador de qualidade de energia, comparar os resultados com a referência de limites de distorção harmônica vigente no país e com resultados simulados;

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Histórico dos Harmônicos

1.3.1.1 Os Primórdios dos Harmônicos no Sistema Elétrico

Os harmônicos estão presentes no sistema elétrico. Atribui-se esse fenômeno, geralmente, aos diversos componentes elétricos não-lineares conectados à rede elétrica. Os efeitos de sua presença são sempre danosos aos componentes da rede, sendo um dos tópicos mais desafiantes aos engenheiros atuantes no sistema elétrico.

Em 1893, com a corrente alternada sendo ainda uma nova tecnologia, engenheiros da cidade de Hatford (EUA) se depararam com problemas complexos de aquecimento em um motor. Para identificar e resolver o problema, os engenheiros conduziram análises de componentes harmônicas em várias formas de onda ao longo do sistema em que o motor se encontrava conectado. Este, segundo Owen (1998), foi o primeiro relato da consideração da presença dos harmônicos em um sistema elétrico.

Em 1896, o sistema de transmissão de energia de Portland (EUA) passou por problemas que foram diagnosticados como sendo efeitos da ressonância devido às componentes harmônicas propagadas na linha (OWEN, 1998). Sabe-se, nos dias atuais, que o problema apresentado não se deu exclusivamente pelas perdas de potência ativa de harmônicos ($R.I_h^2$). As perdas devido aos harmônicos podem também ser causadas por efeito pelicular, perdas no aço, vibrações mecânicas e ruídos audíveis (SUTHERLAND; BRUSSO, 2015).

O próximo problema a surgir, segundo a literatura, está ligado à operação de geradores em paralelo. Em (RHODES, 1910), apresenta-se a situação de excessiva corrente circulando no neutro devido à interconexão do mesmo nessa configuração de operação de geradores. Hoje em dia, esse é um problema familiar envolvendo a tensão de terceiro harmônico em máquinas conectadas em estrela.

Em 1910 surgiu o Fator de Interferência Telefônica (FIT) (OWEN, 1998). Esse índice foi resultado de uma série de pesquisas envolvendo a interferência dos harmônicos do sistema de potência no sistema telefônico (OSBORNE, 1919). Essa pesquisa permite se ter uma visão da complexidade e dimensão da influência dos harmônicos no sistema elétrico.

1.3.1.2 Os Harmônicos e a Evolução da Indústria

A chegada da eletricidade à indústria de manufatura trouxe consigo o aumento considerável das cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico.

No início do século XX, o forno a arco foi introduzido na indústria de produção de aço. Este se tratava de uma potencial fonte de harmônicos. Para minimizar os impactos nos outros consumidores do sistema elétrico, tipicamente, se conectava essa carga ao sistema de transmissão. O funcionamento e impactos desse dispositivo são discutidos mais detalhadamente em Steinmetz (1905).

Ainda no início do século XX, surgia o primeiro dispositivo da eletrônica de potência a ser empregado em larga escala na indústria, o retificador a arco de mercúrio. Nesse dispositivo, a válvula a mercúrio tem função retificadora, sendo seu funcionamento explicado em Prince (1926). Em Rissik (1932) é apresentado um estudo sobre a produção e mitigação harmônica das configurações desse tipo de retificador.

Em 1957 houve uma revolução na eletrônica de potência com o desenvolvimento do SCR pela General Electric. Esse componente propiciou a aplicação de técnicas de controle de velocidade em motores, ocorrendo dessa forma a sua rápida proliferação. Contudo, devido às características semi-condutoras e de dispositivo chaveado, injeta harmônicos no sistema quando em operação. Tal problema levou os engenheiros ao desenvolvimento de técnicas que minimizem a magnitude dos harmônicos (SUTHERLAND; BRUSSO, 2015).

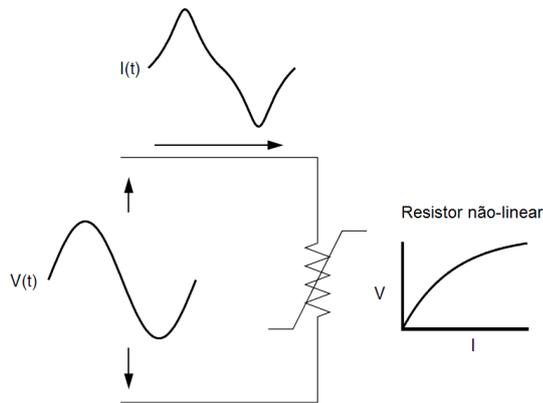
Assim como para o SCR, em 1980, com o surgimento do IGBT, surgiram novas possibilidades de controle e da mesma forma técnicas de minimização da ordem e da amplitude harmônica, como é a técnica de chaveamento *Sinusoidal Pulse Width Modulation*(SPWM)(SUTHERLAND; BRUSSO, 2015).

Outro importante tópico na análise harmônica em sistemas elétricos de potência é referente à compensação reativa. Já em 1960, eram muitos os sistemas elétricos industriais com capacitores *shunt* instalados e ainda não havia muita preocupação em relação à ressonância harmônica. Os bancos de capacitores podem produzir circuitos ressonantes com a indutância dos transformadores de potência. Se a frequência de ressonância é próxima à produzida pelos harmônicos em retificadores, o resultado pode ser desastroso (SUTHERLAND; BRUSSO, 2015). Por esse motivo, muitos dos bancos de capacitores, hoje em dia, possuem reatores em série, aos quais funcionam como filtros de harmônicos (OWEN, 1998).

1.3.2 Distorção Harmônica

A distorção harmônica é causada principalmente por cargas não-lineares no sistema elétrico. Uma carga não-linear é aquela em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada. A Figura 1 ilustra esse conceito para o caso de uma tensão senoidal aplicada a um resistor não-linear em que tensão e corrente variam segundo a curva mostrada.

Figura 1 – Comportamento de uma Carga Não-Linear



(DUGAN, 2002)

Enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante é distorcida. Nesse caso, um pequeno aumento na tensão pode causar uma grande elevação na corrente, causando a deformação na forma de onda.

Toda forma de onda distorcida periodicamente pode ser expressa com uma soma de ondas puramente senoidais em que a frequência de cada senóide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental. A soma das senóides é referida como série de Fourier (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1.1)$$

em que,

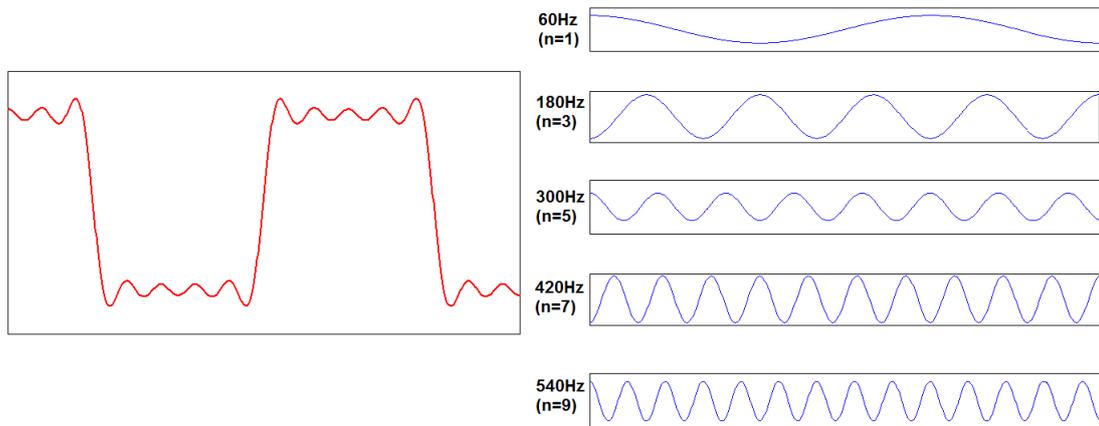
a_0 , a_n e b_n são os coeficientes de Fourier;

n é o índice da série;

L é o termo relacionado ao período da função.

Exemplifica-se a série de Fourier através da Figura 2.

Figura 2 – Representação da Série de Fourier de uma Onda Distorcida



Quando tanto a metade positiva quanto a negativa da forma de onda possuem formatos idênticos, a série de Fourier possui apenas componentes harmônicas ímpares (DUGAN, 2002)(OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). Isso oferece uma prática simplificação para a maioria dos sistemas elétricos estudados, pois os dispositivos que comumente provocam harmônicos tem como resultante uma forma de onda simétrica. A presença de harmônicos pares é frequentemente um indicio de funcionamento anormal da carga ou dos transdutores de medição, havendo excessões como retificadores de meia onda e fornos a arco.

Usualmente, os harmônicos de mais alta ordem (25^a até 50^a) são desprezíveis para análises em sistemas de potência. No entanto, para sistemas eletrônicos, podem ser danosos. Geralmente, é difícil se coletar dados suficientes para se realizar a modelagem do sistema nessas frequências, contudo esse procedimento é necessário quando se deseja realizar o estudo acerca de possíveis interferências em equipamentos eletrônicos e ressonâncias no próprio sistema (DUGAN, 2002).

1.3.3 Índices Harmônicos

Os dois índices mais comumente usados para avaliação do conteúdo harmônico de uma forma de onda são a Distorção Harmônica Total (DHT) e a Distorção Total da Demanda (DTD). Ambos índices podem ser aplicados tanto para corrente quanto para a tensão (DUGAN, 2002).

1.3.3.1 Distorção Harmônica Total

A DHT é a medida do valor efetivo das componentes harmônicas na forma de onda distorcida, ou seja, a relação entre o conteúdo harmônico e a componente fundamental.

A representação matemática desse índice é mostrada na Equação (1.2)(DUGAN, 2002).

$$DHT(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} * 100 \quad (1.2)$$

Em que M_h é o valor rms da componente harmônica de ordem h do parâmetro M .

Sendo feita a análise para uma única componente, ou seja, $h = cte$, este índice se torna conhecido como Distorção Harmônica Individual (DHI). Em ANEEL (2010), caracteriza-se a distorção individual apenas para componentes de tensão, sendo sua nomenclatura representada como Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIT).

O valor *rms* da forma de onda distorcida pode ser relacionada à Equação (1.2) pela Equação (1.3).

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 * \sqrt{1 + DHT^2} \quad (1.3)$$

A DHT é mais frequentemente usada para descrever o comportamento da tensão. Este fato é explicado pela baixa variação percentual da componente fundamental da tensão ao longo de um sistema elétrico (DUGAN, 2002)(ARRILLAGA, 2003).

1.3.3.2 Distorção Total da Demanda

A distorção de níveis de corrente pode ser caracterizada através do valor da DHT. Contudo, essa prática deve ser realizada com atenção, pois pode levar a interpretações errôneas. Uma pequena corrente pode ter uma alta DHT mas não ser um problema significativo para o sistema. Por exemplo, muitos circuitos para controle de velocidade de motores podem exibir altos valores de DHT ao operarem com pouca carga. Neste caso, embora a distorção harmônica seja alta, as componentes harmônicas de corrente são irrelevantes ao sistema.

A dificuldade de interpretação dos valores da DHT para correntes é sanada com a Distorção Total da Demanda (DTD)(IEEE, 1992). Ao invés de se relacionar as componentes harmônicas com a componente fundamental da amostra naquele instante, realiza-se a relação com o máximo valor da componente fundamental registrado. Matematicamente a DTD é dada pela Equação (1.4).

$$DTD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_L} * 100 \quad (1.4)$$

Em que M_L é o valor da corrente associada à demanda máxima da carga na frequência fundamental.

1.3.4 Normas e Procedimentos

1.3.4.1 Procedimento de Rede - Submódulo 2.8

Esse procedimento é o que estabelece, a nível nacional, os limites harmônicos para as redes, barramentos de transformadores e seus componentes. Foi desenvolvido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Nesse procedimento são considerados apenas valores referentes à operação em regime permanente. Não são contemplados fenômenos transitórios ou de curta duração que resultem em injeção de correntes harmônicas, como ocorre, por exemplo, na energização de transformadores (ONS, 2009).

Os limites globais e individuais especificados são apresentados nas Tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1 – Limites Globais de Tensão

| V < 69kV | | | | V ≥ 69kV | | | |
|----------|----------|-------|----------|----------|----------|-------|----------|
| Ímpares | | Pares | | Ímpares | | Pares | |
| Ordem | Valor(%) | Ordem | Valor(%) | Ordem | Valor(%) | Ordem | Valor(%) |
| 3,5,7 | 5% | | | 3,5,7 | 2% | | |
| | | 2,4,6 | 2% | | | 2,4,6 | 1% |
| 9,11,13 | 3% | | | 9,11,13 | 1,5% | | |
| | | ≥ 8 | 1% | | | ≥ 8 | 0,5% |
| 15 a 25 | 2% | | | 15 a 25 | 1% | | |
| ≥ 27 | 1% | | | ≥ 27 | 0,5% | | |

(ONS, 2009)

Tabela 2 – Limites Individuais de Tensão

| 13,8kV ≤ V < 69kV | | | | V ≥ 69kV | | | |
|-------------------|----------|-------|----------|----------|----------|-------|----------|
| Ímpares | | Pares | | Ímpares | | Pares | |
| Ordem | Valor(%) | Ordem | Valor(%) | Ordem | Valor(%) | Ordem | Valor(%) |
| 3 a 25 | 1,5% | | | 3 a 25 | 0,6% | | |
| | | todos | 0,6% | | | todos | 0,3% |
| ≥ 27 | 0,7% | | | ≥ 27 | 0,4% | | |

(ONS, 2009)

1.3.4.2 PRODIST

O documento Módulo 8 do PRODIST-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, trata dos limites de DHT de acordo com a classe de tensão, e será o parâmetro de referência para as análises deste trabalho, já que os equipamentos monitorados estão conectados à diferentes níveis de tensão. Na Tabela 3

estão os valores de referência globais das distorções harmônicas para diferentes níveis de tensão.

Tabela 3 – Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais

| Tensão no barramento(kV) | Máxima THD(%) |
|--------------------------|---------------|
| $V \leq 1$ | 10 |
| $1 < V \leq 13,8$ | 8 |
| $13,8 < V \leq 69$ | 6 |
| $69 < V < 230$ | 3 |

(ANEEL, 2010)

1.3.4.3 IEEE Std 519-1992

Esse guia internacional contém recomendações para os limites harmônicos e práticas recomendáveis para o design de equipamentos em sistemas elétricos que incluem tanto cargas lineares quanto não lineares (IEEE, 1992).

Por conter especificações sobre equipamentos específicos como, por exemplo, conversores e fornos a arco, esse guia se tornou referência nas indústrias. Encontra-se na literatura uma vasta quantidade de trabalhos acerca de sua aplicação e interpretação no ambiente industrial (SWAMY et al., 1994)(LAI, 1997)(LUDBROOK, 2001)(HANSEN, 2008)(KOPCAK, 2013).

1.3.4.4 IEC 61000

A série de normas IEC 61000 é subdividida em várias partes, sendo apresentadas em Teixeira (2009) as mais relevantes à caracterização harmônica em sistemas elétricos.

IEC 61000-2-2

Apresenta distúrbios de baixa frequência e níveis harmônicos em redes de baixa tensão. São estabelecidos limites individuais e totais de distorção harmônica, sendo o valor máximo do primeiro dependente da ordem harmônica.

IEC 61000-3-2

Tem como propósito garantir que os harmônicos de corrente gerados e injetados na rede não possibilitem o aumento dos níveis da distorção harmônica de tensão nas barras do sistema além dos limites descritos na parte IEC 61000-2-2.

São tratados nessa parte equipamentos que drenam até 16A por fase. Para equipamentos com correntes por fase de 16A até 75A deve se consultar a norma IEC 61000-3-4.

A classificação das cargas é feita em quatro classes:

- Classe A – Equipamentos trifásicos equilibrados e qualquer outro equipamento não pertencente às classes B, C e D;
- Classe B – Equipamentos portáteis;
- Classe C – Equipamentos de iluminação (incluindo “dimmerizados”);
- Classe D – Equipamentos com o formato da corrente de entrada incomum e com potência ativa inferior a 600 W.

Os limites especificados para cada classe são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites de Correntes Harmônicas para Equipamentos Classes A,B,C e D

| Ordem (n) | Classe (%) | | | |
|--------------|-------------------|--------------------|---------|-------------------|
| | A | B | C | D |
| 2 | 1,08 | 1,62 | 2 | |
| 3 | 2,3 | 3,45 | 30*F.P. | 2,3 |
| 4 | 0,43 | 0,645 | | |
| 5 | 1,14 | 1,71 | 10 | 1,14 |
| 6 | 0,3 | 0,45 | | |
| 7 | 0,77 | 1,155 | 7 | 0,77 |
| 9 | 0,40 | 0,6 | 5 | |
| 11 | 0,33 | 0,495 | 3 | 0,33 |
| 13 | 0,21 | 0,315 | 3 | 0,21 |
| 15-39 | $0,15 \cdot 15/n$ | $0,225 \cdot 15/n$ | 3 | $0,15 \cdot 15/n$ |

(IEC, 2014)

IEC 61000-3-6

Índica os níveis máximos de distorção de corrente para equipamentos conectados às redes de média(MT) e alta tensão(AT). Os limites são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites de Distorções Harmônicas para Média e Alta Tensão

| Harmônicos Ímpares não Múltiplos de 3 | | | Harmônicos Ímpares Múltiplos de 3 | | | Harmônicos Pares | | |
|--|----------------|----------------|--------------------------------------|--------|-----|------------------|--------|-----|
| h | DIT(%) | | h | DIT(%) | | h | DIT(%) | |
| | MT | AT | | MT | AT | | MT | AT |
| 5 | 5 | 2 | 3 | 4 | 2 | 2 | 1,6 | 1,5 |
| 7 | 4 | 2 | 9 | 1,2 | 1 | 4 | 1 | 1 |
| 11 | 3 | 1,5 | 15 | 0,3 | 0,3 | 6 | 0,5 | 0,5 |
| 13 | 2,5 | 1,5 | 21 | 0,2 | 0,2 | 8 | 0,4 | 0,4 |
| 17 | 1,6 | 1 | >21 | 0,2 | 0,2 | 10 | 0,4 | 0,4 |
| 19 | 1,2 | 1 | | | | 12 | 0,2 | 0,2 |
| 23 | 1,2 | 0,7 | | | | >12 | 0,2 | 0,2 |
| 25 | 1,2 | 0,7 | | | | | | |
| >25 | $0,2+0,5*25/h$ | $0,2+0,5*25/h$ | | | | | | |

(IEC, 2008)

2 Medição de Harmônicos

2.1 Metodologia

A obtenção dos valores dos indicadores a serem comparados com os valores limites deve se dar, segundo o item 9.4.2 em ONS (2009), da seguinte forma:

- (a) [...], considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos; e
- (b) o valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

A medição deve ser feita o mais próximo possível da carga em equipamentos individuais e no ponto de acoplamento comum entre consumidor e fornecedor em redes elétricas (IEEE, 1992)(PAICE, 1996).

2.2 Equipamento de Medição

2.2.1 Pré-requisitos

Em (IEEE, 1992) discutem-se algumas das características que um medidor para o monitoramento harmônico deve conter:

Exatidão

O instrumento deve realizar medidas em uma componente harmônica constante (estado estacionário) com um erro compatível com os limites permitidos. É razoável usar instrumentos com incertezas menores que 5% dos limites permitidos. Por exemplo, indica-se que em um sistema em que a 11ª harmônica deve ser menor que 1,94V se use um medidor com uma incerteza menor que $\pm(0,05) * (1,94) = \pm 0,097V$.

Seletividade

A seletividade de um instrumento representa a capacidade de seleção de componentes harmônicas em diferentes frequências. Na Tabela 6 é apresentada a mínima atenuação requerida em função da frequência.

Tabela 6 – Mínima Atenuação Requerida

| Frequência (Hz) | Domínio da Frequência (dB) | Domínio do Tempo (dB) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|
| 60 | 0 | 0 |
| 30 | 50 | 60 |
| 120 até 720 | 30 | 50 |
| 720 até 1200 | 20 | 40 |
| 1200 até 2400 | 15 | 35 |

(IEEE, 1992)

Grande parte dos medidores pode medir em até 60dB (0,1% da componente harmônica fundamental). Equipamentos de alto custo podem alcançar até 90dB (0,00316% da componente harmônica fundamental), ou seja, são capazes de medir uma maior faixa de componentes harmônicas.

Cálculo Instantâneo

Se o medidor possui a capacidade de operação em tempo real, é necessário que ele possua uma rápida resposta às variações abruptas do sistema, ou seja, uma rápida capacidade de processamento. Da mesma forma, é necessário que o medidor possua uma resposta em frequência adequada à sua aplicação. Segundo ANEEL (2010), o equipamento utilizado deve compreender em seu espectro harmônico uma faixa de frequências desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25^a ordem harmônica.

2.2.2 Analisador de Energia 8335

O medidor utilizado neste trabalho é o *POWERPAD 8335* (vide Figura 3) da *AEMC Instruments*. As pontas de prova são do modelo *AmpFlex 193-24-BK*, as quais suportam até 6500A.

Figura 3 – Analisador de Energia 8335



As especificações do equipamento são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Especificações PowerPad 8335

| ESPECIFICAÇÕES | |
|------------------------|---|
| ELÉTRICA | |
| Amostra de Frequência | 256 amostras por ciclo |
| Armazenamento de dados | 2GB cartão SD |
| Tensão (TRMS) | Fase-a-Fase - 1000V Fase-a-Neutro - 1000V |
| Corrente (TRMS) | Sensor (tc's) MN: 0 a 6A/120A ou 0 a 240A SR: 0 a 1200A MR: 0 a 1000A AC, 10 a 1400A DC MiniFlex: 0,1 a 1000A AmpFlex: 0 a 6500A |
| Frequência (Hz) | 40 a 69Hz |
| Outras medições | kW, kVA, PF, DPF, kWh, kVAh, kVAh, Fator K, Cintilação |
| Harmônicas | 1 a 50 ^o , Direção e sequência |
| Alimentação | 9.6 NiMH - bateria recarregável Corrente AC: 110/230V AC ±10% (50/60 Hz) |
| Vida da bateria | ≥ 8 horas com o display ligado ≤ 35 horas com o display desligado (modo de gravação). |
| MECÂNICA | |
| Porta de comunicação | RS-232 |
| Dimensão | 9,8 x 7,8 x 2,6" (250 x 200 x 67mm) |
| Peso | 4.3 lbs (1,95 kg) |
| DISPLAY | |
| Tipo | 1/4 VGA (320 x 240) LCD colorido |
| SEGURANÇA | |
| Categoria de segurança | EN 61010-1, 600V CAT IV , Grau de Poluição 2 |

A exatidão do equipamento é de 0,1%, enquanto a seletividade, assim como apresentado na Tabela 7, vai da 1^a até a 50^a harmônica.

3 Fontes de Harmônicos

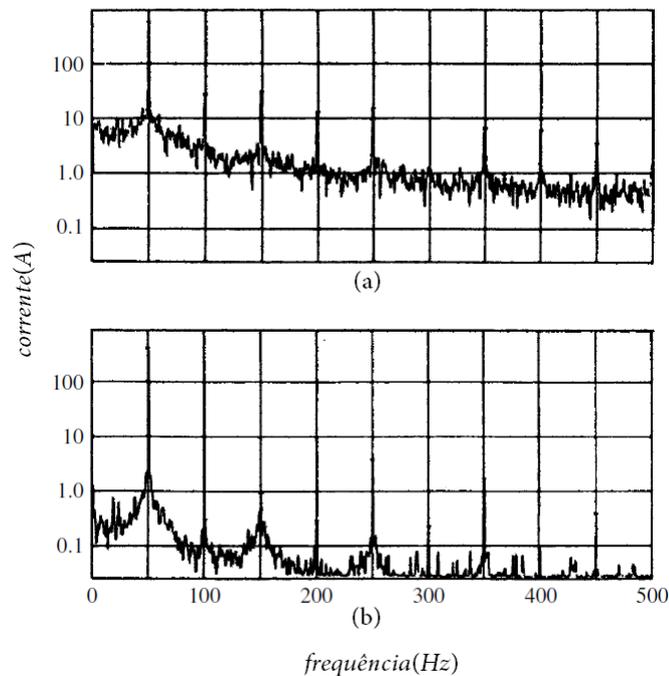
3.1 Forno a Arco Elétrico

Os fornos a arco possuem a característica de tensão-corrente altamente não linear. A forma de onda, quando em operação, possui formato quase trapezoidal e sua magnitude é função do comprimento do arco (DUGAN, 2002).

Após o surgimento do arco, a tensão decai e a corrente se torna a corrente de curto circuito, sendo essa limitada apenas pela impedância do sistema elétrico. A corrente nesses dispositivos alcança valores acima de 60kA (ARRILLAGA, 2003).

Durante a fase de derretimento do aço, devido às variações súbitas do comprimento do arco, ocorre a modulação da frequência (predominantemente entre 0.1Hz e 30Hz) em torno das componentes harmônicas presentes. Durante o processo de refinamento o arco assume um comportamento menos aleatório, mas ainda existe a modulação devido ao contínuo movimento do material derretido e à interação eletromagnética entre os eletrodos (ARRILLAGA, 2003). A Figura 4 apresenta o comportamento harmônico para os dois casos, sendo apresentados os valores típicos de operação segundo IEEE (1992) na Tabela 8.

Figura 4 – Componentes Harmônicas (a)Derretimento (b)Refinamento



(ARRILLAGA, 2003)

Tabela 8 – Conteúdo Harmônico de um Forno a Arco (%)

| Condições do Forno | Ordem Harmônica | | | | |
|-----------------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |
| Derretimento (arco inicial) | 7.7 | 5.8 | 2.5 | 4.2 | 3.1 |
| Refinamento (arco estável) | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 2.1 | 0.0 |

(IEEE, 1992)

3.2 Iluminação

A iluminação representa por volta de 40% a 60% das cargas em prédios comerciais e industriais (DUGAN, 2002). As lâmpadas fluorescentes, devido ao menor consumo, são uma escolha recorrente para essa aplicação em residências e comércios. Na indústria, devido às características de luminosidade, é frequente o uso de lâmpadas de vapor metálico (sódio ou mercúrio).

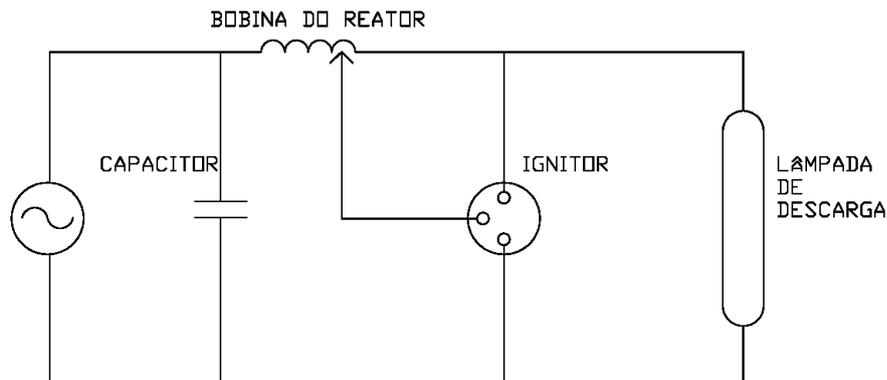
Lâmpadas fluorescentes e de vapor metálico se enquadram na categoria de lâmpadas por descarga, ou seja, necessitam de reatores para prover a alta tensão necessária para iniciar a descarga de corrente através do gás enclausurado. Em aplicações de iluminação, reatores funcionam também como limitadores de corrente, visto que com a descarga estabilizada a tensão decai e a corrente aumenta, devendo neste momento o reator agir rapidamente de forma a reduzir a corrente aos níveis especificados para produzir a luminosidade requerida (ARRILLAGA, 2003).

Existem basicamente dois tipos de reatores, os eletrônicos e os magnéticos.

O modelo magnético possui um núcleo de aço que, com o aparelho em funcionamento, gera perdas por aquecimento, tornando-se ineficiente em relação ao modelo eletrônico.

O circuito elétrico do reator magnético é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Circuito do Reator



Este tipo de circuito aplica pulsos de alta tensão (aproximadamente 1kV) para estabelecer a circulação de corrente através do tubo de descarga. Com a lâmpada em funcionamento, o circuito se comporta limitando a corrente e tensão fornecidas.

Os reatores eletrônicos empregam como fontes de alimentação conversores chaveados. Esse fato torna possível a conversão da frequência fundamental para níveis altos, tipicamente de 25kHz até 40kHz. Os níveis altos de frequência possibilitam o uso de um indutor de pequeno valor como limitador de corrente e também reduzem os efeitos do *flicker* (cintilamento luminoso causado em sistemas de iluminação por variações de tensão).

Comparativamente, reatores que possuem fontes de alimentação chaveadas podem produzir de duas a três vezes mais harmônicos do que reatores magnéticos. O modelo eletrônico produz tipicamente uma DHT de corrente de 10% à 32%, dessa forma faz-se necessário o uso de filtros nesses dispositivos para redução desses valores (ARRILLAGA, 2003)(DUGAN, 2002).

Por se tratarem de uma fonte significativa de harmônicos, é usual se realizar o balanceamento dessas cargas entre as fases do sistema elétrico, a fim de evitar a amplificação de seus efeitos indesejáveis.

3.3 Conversores

3.3.1 CA-CC

A retificação é a única etapa requerida no controle de velocidade de motores C.C.. Os retificadores controlados de 6 pulsos (vide Figura 6) são largamente utilizados nessa aplicação, sendo os retificadores de 12 pulsos (vide Figura 7) utilizados para fins de redução harmônica, ao substituir os de 6 pulsos.

Figura 6 – Retificador Controlado de 6 Pulsos

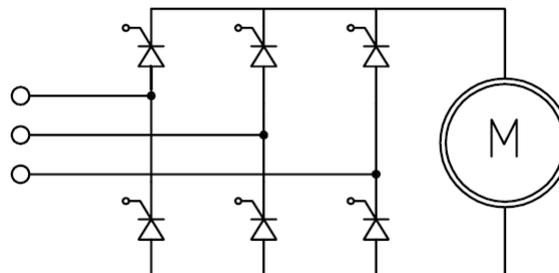
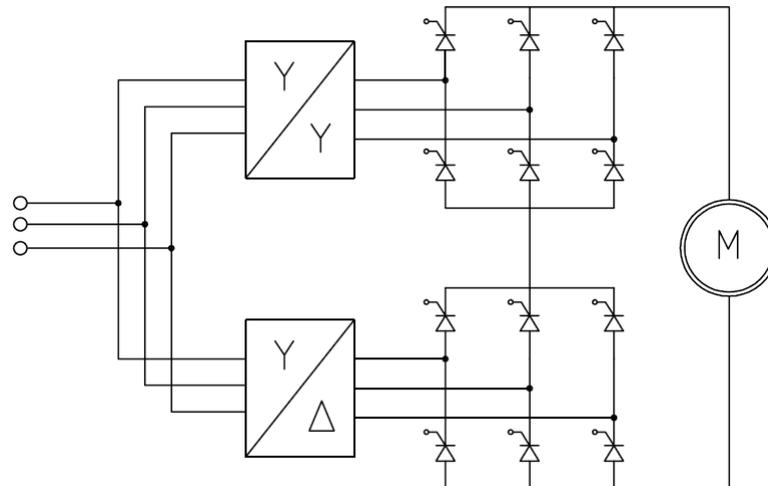


Figura 7 – Retificador Controlado de 12 Pulsos



As duas componentes harmônicas mais significativas no retificador de 6 pulsos são a quinta e a sétima. Através da retificação de 12 pulsos pode se atenuar essas componentes em até 90%. A desvantagem do método de 12 pulsos é o maior custo em componentes eletrônicos e o uso de um transformador adicional (DUGAN, 2002).

Um conversor CA-CC com número p de pulsos gera harmônicos de corrente de ordem $n = pk \pm 1$ no lado C.A., em que k é um número inteiro. Os harmônicos que possuem ordem de acordo com essa equação são denominados harmônicos característicos (TEIXEIRA, 2009). A Tabela 9 apresenta a comparação das ordens das componentes harmônicas para os retificadores de 6 e 12 pulsos.

Tabela 9 – Conteúdo Harmônico de Conversores CA-CC de 6 e 12 Pulsos

| Expressão | k | Ordem Harmônica n=6 | Ordem Harmônica n=12 |
|-----------|---|------------------------|-------------------------|
| nk ± 1 | 0 | Fundamental | Fundamental |
| | 1 | 5º Harmônico | 11º Harmônico |
| | | 7º Harmônico | 13º Harmônico |
| | 2 | 11º Harmônico | 23º Harmônico |
| | | 13º Harmônico | 25º Harmônico |
| | 3 | 17º Harmônico | 35º Harmônico |
| | | 19º Harmônico | 37º Harmônico |

3.3.2 CA-CA

As expressões para corrente harmônica em conversores CA-CA são extremamente complexas (IEEE, 1992). A equação (3.1) representa a frequência do conteúdo harmônico

presente nesse tipo de conversor.

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6n.f_o \quad (3.1)$$

em que,

f_h é a frequência harmônica;

f_1 é a frequência fundamental;

f_o é a frequência de saída;

k é qualquer inteiro positivo;

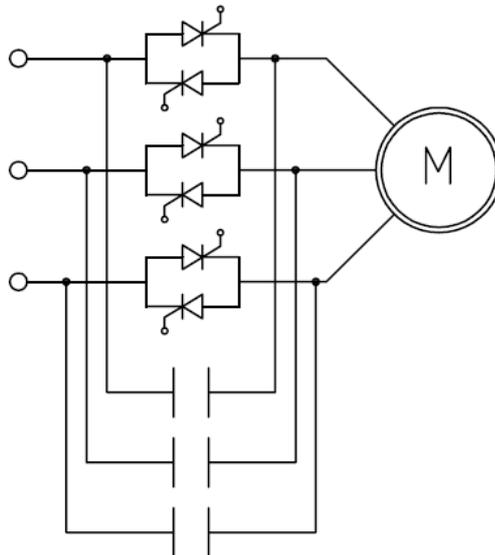
n é o número de níveis do conversor;

q é o número de pulsos do conversor (6, 12 ...).

O primeiro termo da equação representa as componentes de um conversor CA-CA de q pulsos e o segundo representa as componentes vizinhas às encontradas no primeiro termo.

Geralmente se usa um *by pass* nesse tipo de conversor (vide Figura 8); dessa forma, quando o motor alcança seu regime nominal, o conversor sai de operação e o motor é alimentado pela própria rede. Essa técnica possibilita a redução de perdas de potência pelos tiristores assim como a diminuição de emissão de harmônicos para o sistema.

Figura 8 – Conversor CA-CA com By-Pass



3.3.3 CC-CA

Esse tipo de conversor é classificado nos modelos de tensão constante (vide Figura 9) ou corrente constante (vide Figura 10)(DUGAN, 2002).

Figura 9 – Conversor CC-CA de Tensão Constante

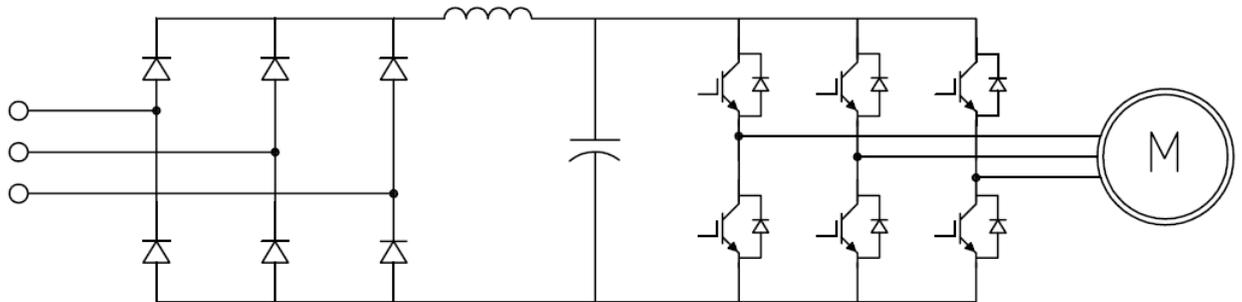
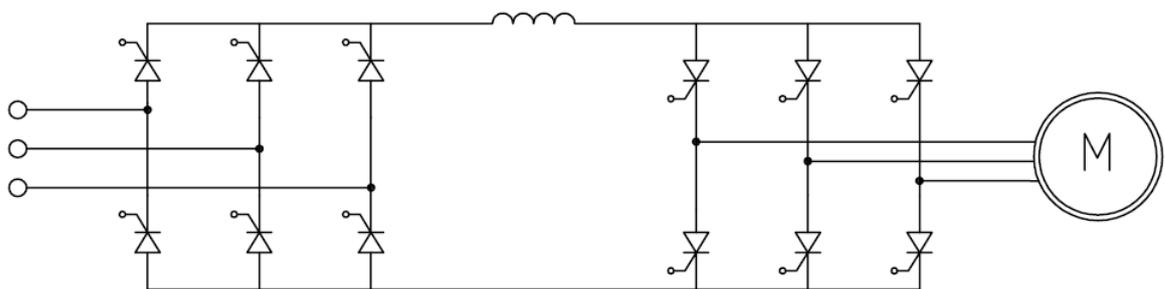


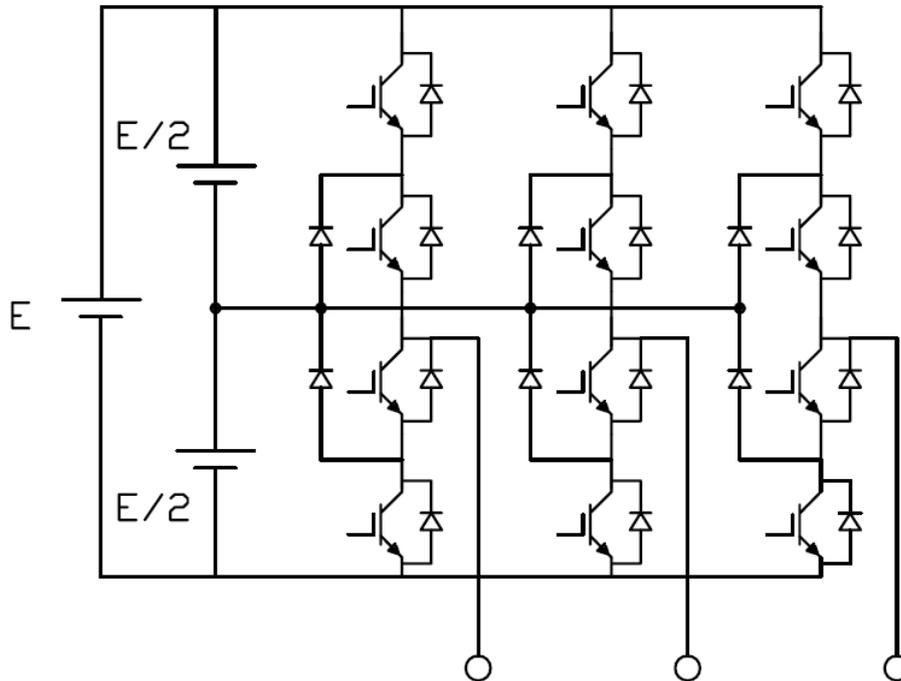
Figura 10 – Conversor CC-CA de Corrente Constante



Neste trabalho, é considerado o conversor do tipo tensão constante. Esse modelo de conversor emprega técnicas de modulação PWM para sintetizar uma forma de onda senoidal em um trem de pulsos de largura variável.

Assim como nos conversores CA-CC, para os conversores CC-CA também é obtida a redução de emissão harmônica através da utilização da configuração multinível. A Figura 11 exemplifica a configuração multinível em conversores CC-CA; nesse caso, o conversor de 3 níveis.

Figura 11 – Conversor CC-CA de 3 Níveis



A distorção harmônica de corrente em conversores CC-CA não é constante. A forma de onda muda significativamente para diferentes condições da carga (DUGAN, 2002). Independentemente desse fato, uma significativa redução harmônica das componentes de baixa ordem pode ser alcançada pelo uso de técnicas complexas de modulação PWM. O desafio nesse caso é encontrar a técnica que, para uma determinada aplicação, permitirá que o conversor alcance a variação linear desejada da tensão em relação à frequência e ainda minimize as perdas harmônicas (ARRILLAGA, 2003). Em Aguirre et al. (2012) faz-se a comparação de dez diferentes técnicas de modulação para o modelo de conversor de tensão constante. Através desta referência, nota-se a variedade de possibilidades de aplicação das técnicas de modulação, assim como a dificuldade em se associar as características de melhora de desempenho à emissão de harmônicos.

4 Modelos Computacionais

Os modelos computacionais auxiliam no estudo de fenômenos ocorridos em sistemas reais. Para que os mesmos sejam efetivos, é necessária uma análise matemática detalhada do sistema em estudo. Nesta seção são apresentados modelos computacionais acerca dos equipamentos estudados neste trabalho.

4.1 Forno a Arco Elétrico

A literatura apresenta basicamente três modelos para a representação matemática dos fornos a arco: Modelo hiperbólico, modelo exponencial e modelo combinado (BHONSLE; KELKAR, 2011)(GOLKAR; MESCHI, 2008).

Modelo Hiperbólico

Nesse modelo, a relação tensão\corrente é dada por:

$$v(i) = v_{at} + \left(\frac{c}{d}\right) + i \quad (4.1)$$

em que,

v e i são a tensão e corrente do arco por fase;

v_{at} é a amplitude da tensão limiar de funcionamento do forno;

c e d são constantes que dependem da amplitude do arco, em que c se relaciona com a potência e d com a corrente.

Modelo Exponencial

Nesse modelo, a relação tensão\corrente é aproximada por uma função exponencial:

$$v(i) = v_{at}(1 - e^{\frac{i}{I_o}})sgn(i) \quad (4.2)$$

em que,

I_o é a constante que representa um degrau inicial de corrente;

$sgn(i)$ é a representação do sinal da corrente.

Modelo Combinado

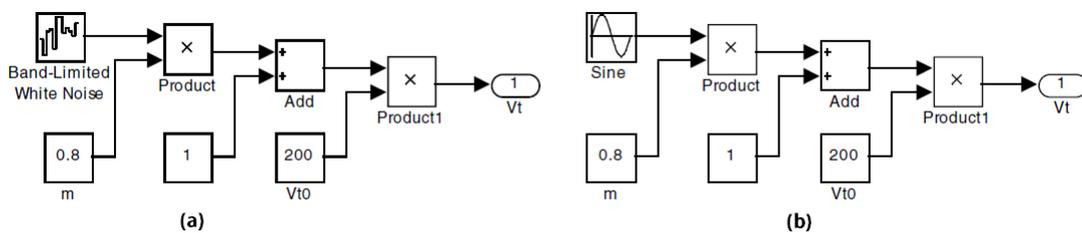
Esse modelo consiste na combinação matemática dos modelos hiperbólico e exponencial. Sua formulação é dada por:

$$v(i) = \begin{cases} v_{at} + \left(\frac{c}{d}\right) + i; & \text{para } \frac{d|i(t)|}{dt} > 0 \\ v_{at}(1 - e^{\frac{i}{I_o}})sgn(i); & \text{para } \frac{d|i(t)|}{dt} < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Essa modelagem consegue representar as condições de derretimento e refinamento do aço, assim como possibilita a melhor aproximação para análise do conteúdo harmônico.

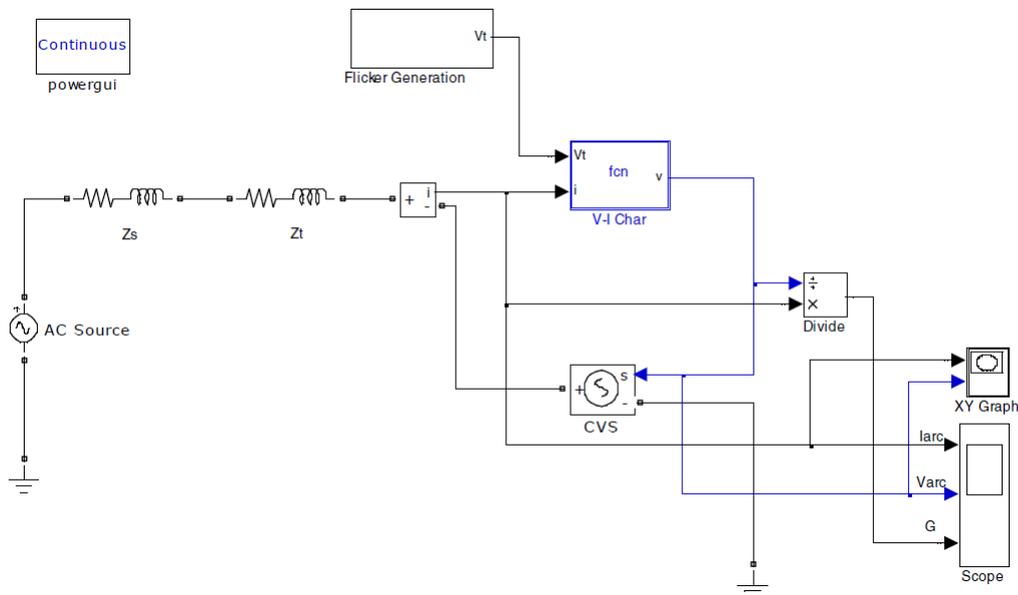
Através dos equacionamentos apresentados foi possível a realização da simulação dos modelos em ambiente *SIMULINK*® considerando-se um caso real (BHONSLE; KELKAR, 2011). Junto ao equacionamento adicionou-se a possibilidade de inserção de distúrbios senoidais ou randômicos de tensão (*Flicker*). Os distúrbios senoidais representam a operação de refino e os distúrbios randômicos representam a fase de derretimento do aço. A representação dos blocos de distúrbio é dada na Figura 12, sendo apresentada na Figura 13 a simulação completa.

Figura 12 – (a)Flicker Randômico (b)Flicker Senoidal



(BHONSLE; KELKAR, 2011)

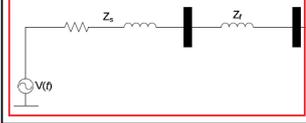
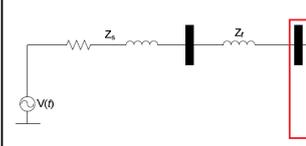
Figura 13 – Simulação Completa



(BHONSLE; KELKAR, 2011)

Os parâmetros da simulação são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros da Simulação

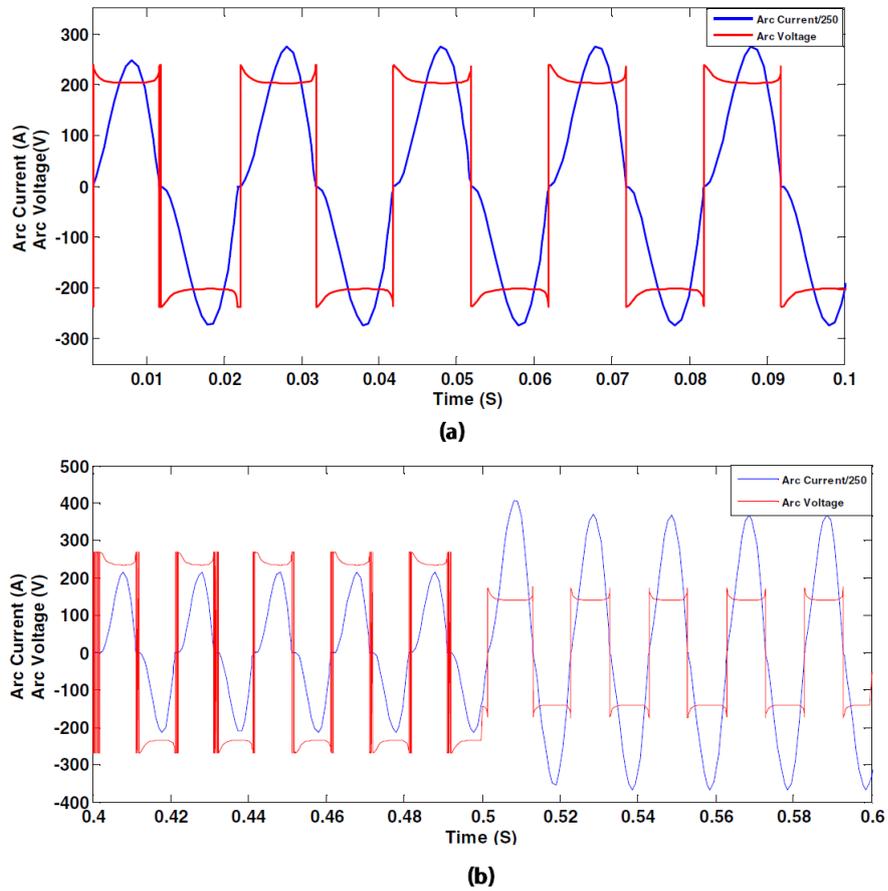
| | |
|---|--|
| <p>Sistema</p>  | <p>V=415 V f=50 Hz $Z_s=(0.0528+j0.468) \text{ m}\Omega$ $Z_t=(0.3366+j3.22) \text{ m}\Omega$</p> |
| <p>Forno</p>  | <p>Vat=200 V C=19 kW D=5 kA I₀=20 kA Vat₀=200 V</p> |

(BHONSLE; KELKAR, 2011)

Os resultados de tensão e corrente do arco para os três modelos obtidos são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17.

Através da simulação do modelo hiperbólico é possível se determinar a influência da saturação dos componentes do sistema na operação do forno. Dessa forma, para o *flicker* randômico, é possível se realizar a aproximação do momento de funcionamento mais crítico, que é o derretimento do aço.

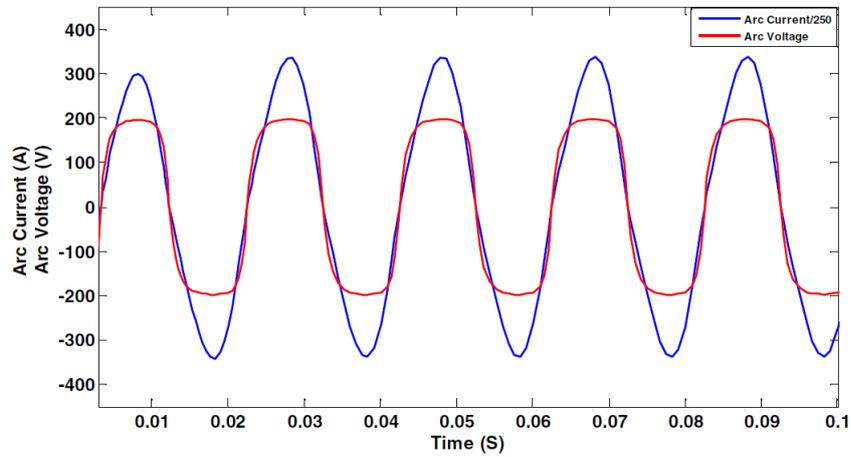
Figura 15 – Tensão e Corrente no Arco para o Modelo Hiperbólico (a)Flicker Senoidal
(b)Flicker Randômico



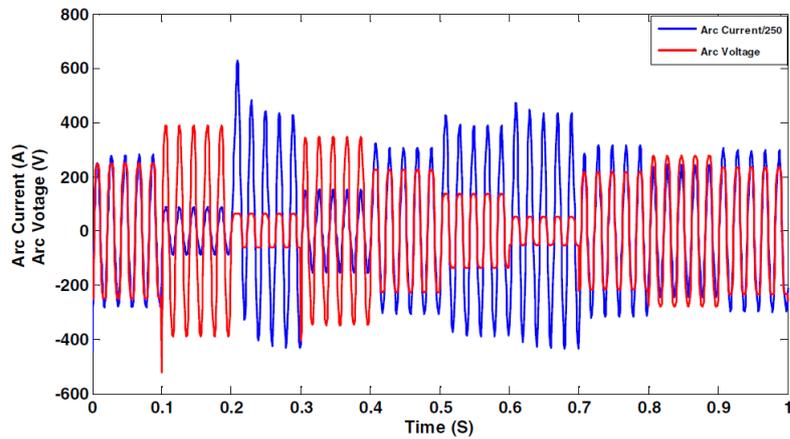
(BHONSLE; KELKAR, 2011)

A simulação do modelo exponencial permite identificar o comportamento do forno como uma carga não linear. Nota-se esse fato pelo achatamento de tensão em relação à corrente. Para o *flicker* randômico esse comportamento é mais presente devido aos pontos de aumento da tensão aplicada.

Figura 16 – Tensão e Corrente no Arco para o Modelo Exponencial (a)Flicker Senoidal
(b)Flicker Randômico



(a)

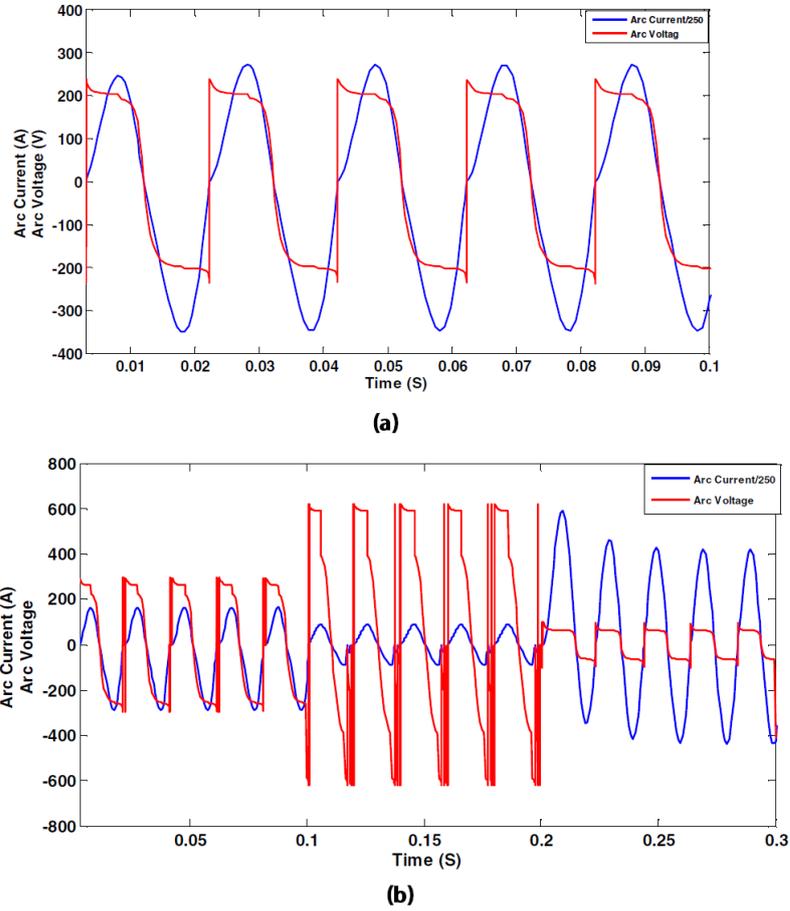


(b)

(BHONSLE; KELKAR, 2011)

O modelo combinado possui as características dos dois modelos anteriores. Dessa forma, tanto a característica não linear quanto a de saturação do sistema são observadas simultaneamente.

Figura 17 – Tensão e Corrente no Arco para o Modelo Combinado (a)Flicker Senoidal
(b)Flicker Randômico



(BHONSLE; KELKAR, 2011)

4.2 Iluminação

Em Andreoli (2011) é realizada a modelagem e simulação de lâmpadas de descarga. Nesse trabalho realiza-se a representação matemática das lâmpadas através do denominado equacionamento termodinâmico. A base desse equacionamento é dada pela seguinte equação:

$$\frac{dT}{dt} = a_1(i^2R - P_{con} - P_{rad}) \quad (4.4)$$

em que,

- $\frac{dT}{dt}$ é a taxa de variação da temperatura do bulbo;
- a_1 é a constante de variação térmica do dispositivo;
- i^2R é a potência elétrica gerada no bulbo;
- P_{con} é a potência dissipada por condução;

P_{rad} é a potência irradiada.

Visto a existência de um bulbo externo e um interno, a temperatura do bulbo externo será dada pelo valor médio quadrático proporcional à temperatura do bulbo interno:

$$T_{bulbo} = \frac{T_{RMS}}{R_{Th}} \quad (4.5)$$

em que,

T_{bulbo} é a temperatura do bulbo externo da lâmpada;

T_{RMS} é o valor médio quadrático da temperatura do bulbo interno;

R_{Th} é o valor da resistência térmica entre o bulbo interno e o bulbo externo.

A potência irradiada é representada por:

$$P_{rad} = a_2 e^{\frac{-q_e \cdot a_3}{k \cdot T}} \quad (4.6)$$

em que,

P_{rad} é a temperatura do bulbo externo da lâmpada;

a_2 e a_3 são constantes de ajuste do modelo de irradiação;

q_e é a carga do elétron;

k é a constante de Boltzmann;

T é a temperatura do plasma em Kelvin.

Considerando a condução térmica como uma função linear, pode-se quantificar o efeito da dissipação do calor como:

$$P_{con} = a_4(T - T_0) \quad (4.7)$$

em que,

P_{con} é a potência dissipada por condução;

a_4 é a constante de condutividade térmica do meio;

T_0 é a temperatura externa ao bulbo em Kelvin.

O comportamento da resistência elétrica do tubo de descarga é descrito por:

$$R = a_5 T^{\frac{-3}{4}} e^{\frac{-q_e \cdot a_6}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (4.8)$$

em que,

a_5 e a_6 são constantes de ajuste do modelo de resistência.

As constantes presentes nas equações são dependentes da forma construtiva de cada dispositivo e referem-se às condições estáveis de operação.

A representação do circuito elétrico composto pela conexão em série entre fonte de alimentação, reator e lâmpada de descarga pode ser feita através da seguinte equação:

$$v = L \cdot \frac{di}{dt} + i(R + r) + v_{ele} \quad (4.9)$$

em que,

v é a tensão da fonte;

L é a indutância do reator;

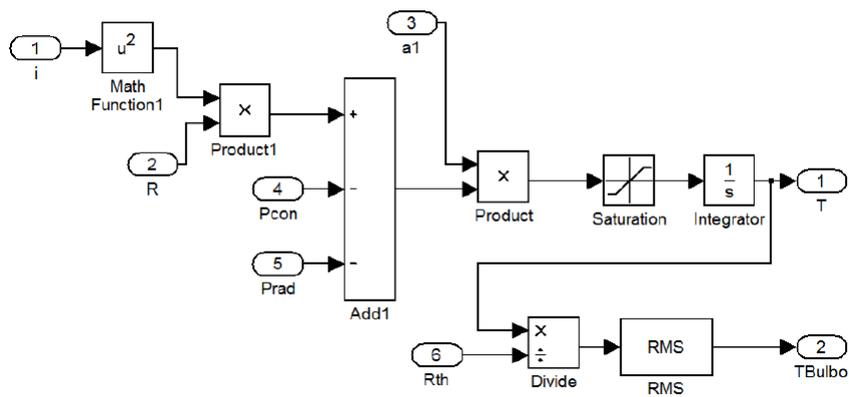
R é a resistência ôhmica do arco de plasma;

r é a resistência ôhmica do reator;

v_{ele} é a queda de tensão nos eletrodos da lâmpada.

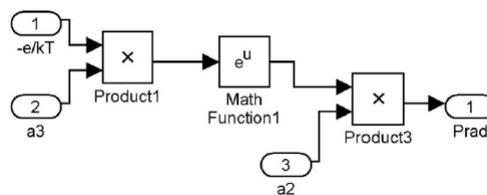
Através dos equacionamentos apresentados foi possível a realização das simulações em ambiente *SIMULINK*® em Andreoli (2011). Os blocos referentes às equações são apresentados a seguir.

Figura 18 – Equação Térmica do Arco



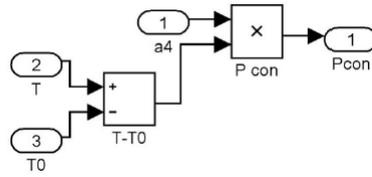
(ANDREOLI, 2011)

Figura 19 – Equação de Potência Irrradiada



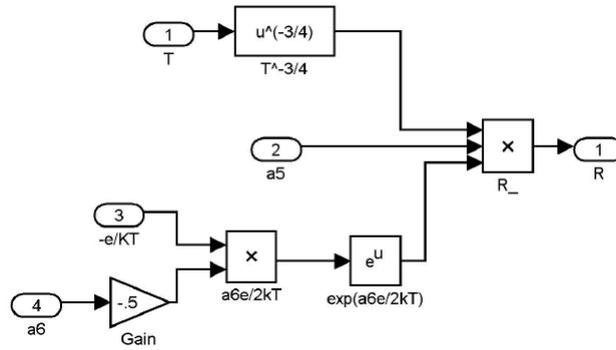
(ANDREOLI, 2011)

Figura 20 – Equação de Potência Dissipada por Condução



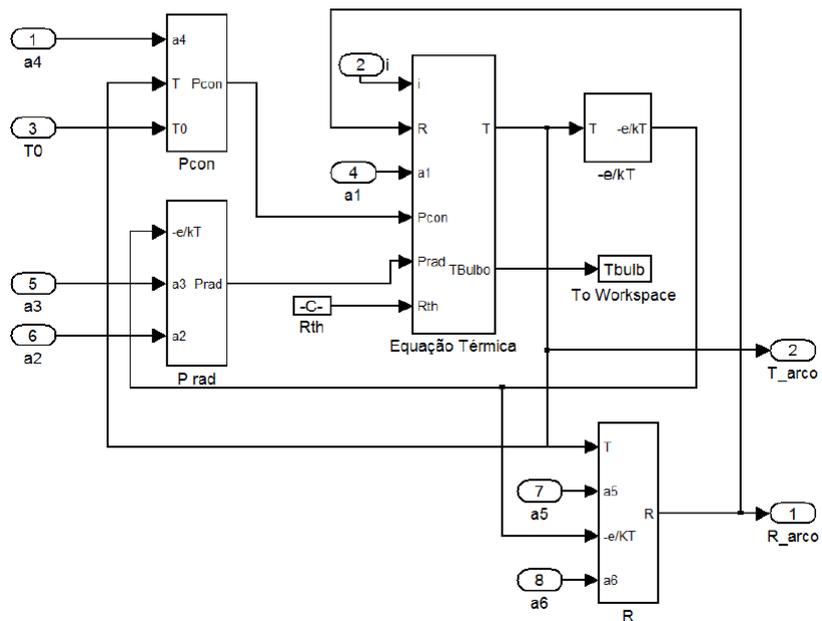
(ANDREOLI, 2011)

Figura 21 – Equação da Resistência da Coluna do Arco



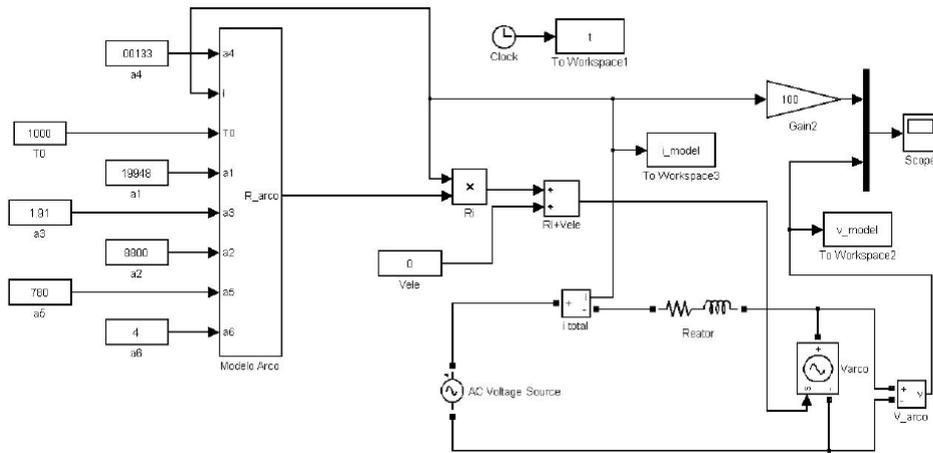
(ANDREOLI, 2011)

Figura 22 – Modelo do Arco na Lâmpada de Descarga



(ANDREOLI, 2011)

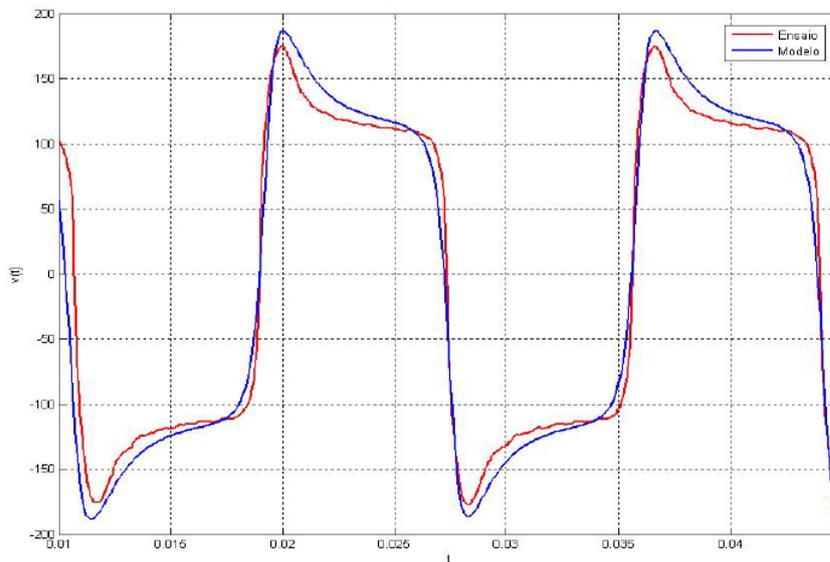
Figura 23 – Modelo Lâmpada-Reator



(ANDREOLI, 2011)

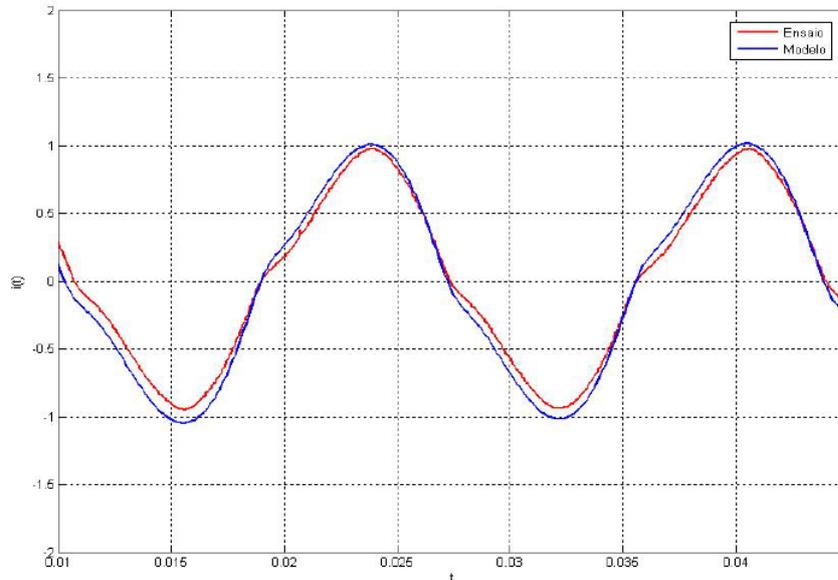
Andreoli (2011) realizou a comparação dos resultados do modelo com os obtidos em um ensaio em uma lâmpada de vapor de mercúrio de 80W, 220V e 60Hz. As Figuras 24 e 25 apresentam a comparação para a tensão e corrente, respectivamente.

Figura 24 – Tensão no arco - Lâmpada de Vapor de Mercúrio 80W



(ANDREOLI, 2011)

Figura 25 – Corrente no arco - Lâmpada de Vapor de Mercúrio 80W



(ANDREOLI, 2011)

Dada a superposição dos gráficos nota-se a semelhança dos resultados obtidos, porém, como descreve o autor, não se pode afirmar que a representação do modelo seja perfeita.

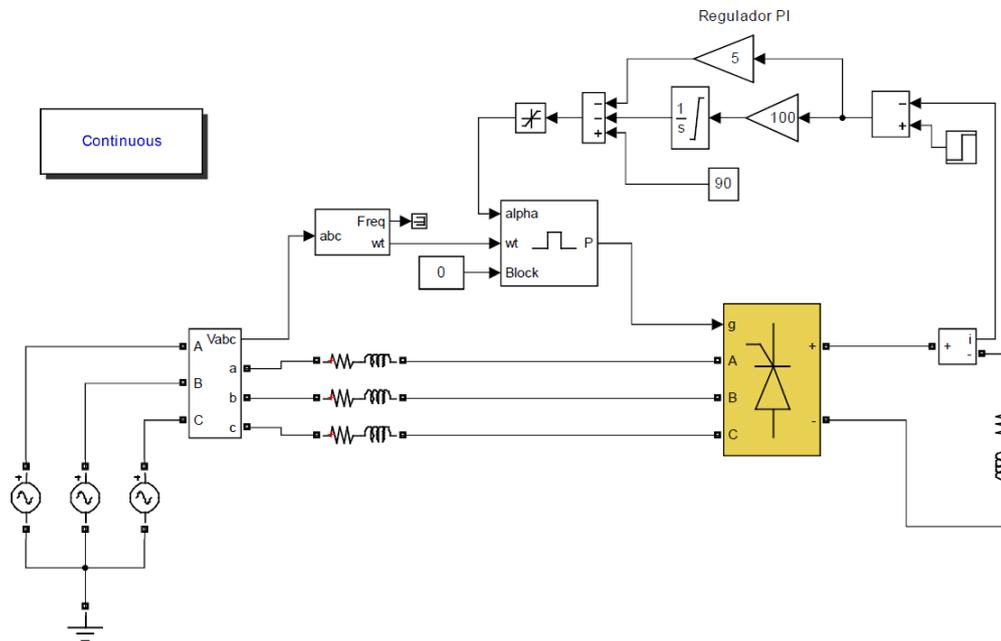
4.3 Conversores

Uma das principais formas de modelagem propiciada pelos simuladores de circuitos elétricos atuais (*PROTEUS*®, *PSIM*®, *SIMULINK*®) é feita através da programação em blocos. Nessa forma de programação, usa-se de modelos computacionais pré programados (blocos) que representam a modelagem matemática de elementos do sistema. O modelo computacional dos conversores estudados neste trabalho é apresentado através dessa técnica em ambiente *SIMULINK*®.

4.3.1 CA-CC

O conversor CA-CC apresentado na Figura 26 se trata do exemplo *POWER_CONVERTER* presente no *SIMULINK*®.

Figura 26 – Conversor CA-CC *SIMULINK*®



Nesta simulação, um trêm de pulsos em fase com a tensão de alimentação é fornecida ao conversor através de um bloco de sincronismo para disparo dos tiristores. A corrente de saída do conversor é controlada por um controlador PI.

As condições de simulação são análogas ao apresentado no Capítulo 5 para o caso real, sendo a carga a resultante RL de uma associação em paralelo de quatro eletroímãs tendo como valor total $R=3\Omega$ e $L=291\text{mH}$.

Os resultados de tensão e corrente em regime permanente na entrada do conversor são apresentados nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Tensão do Conversor CA-CC Simulado

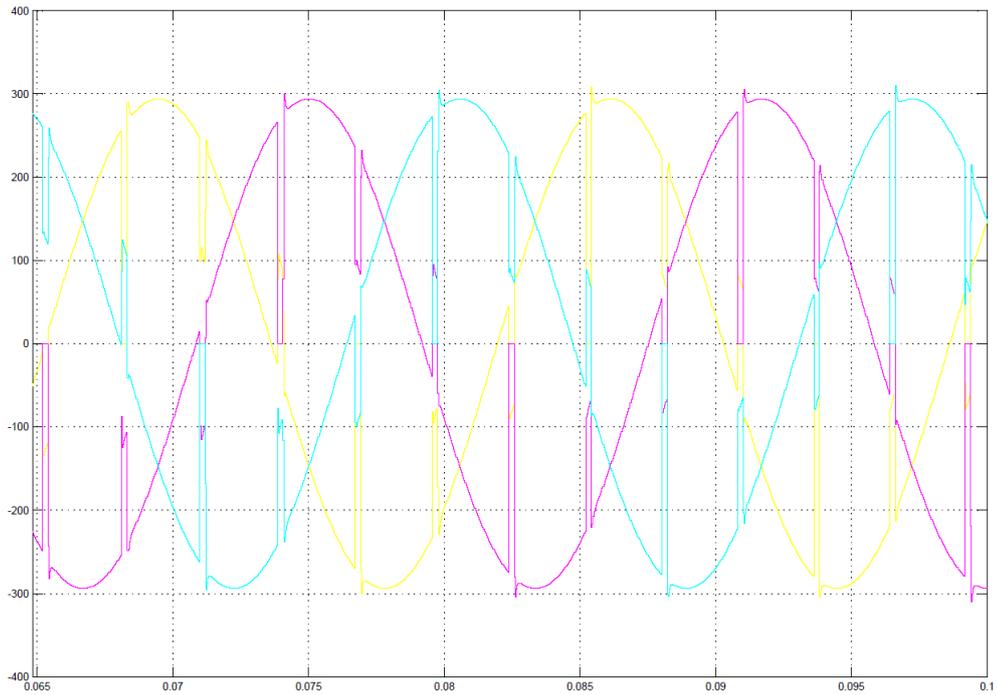
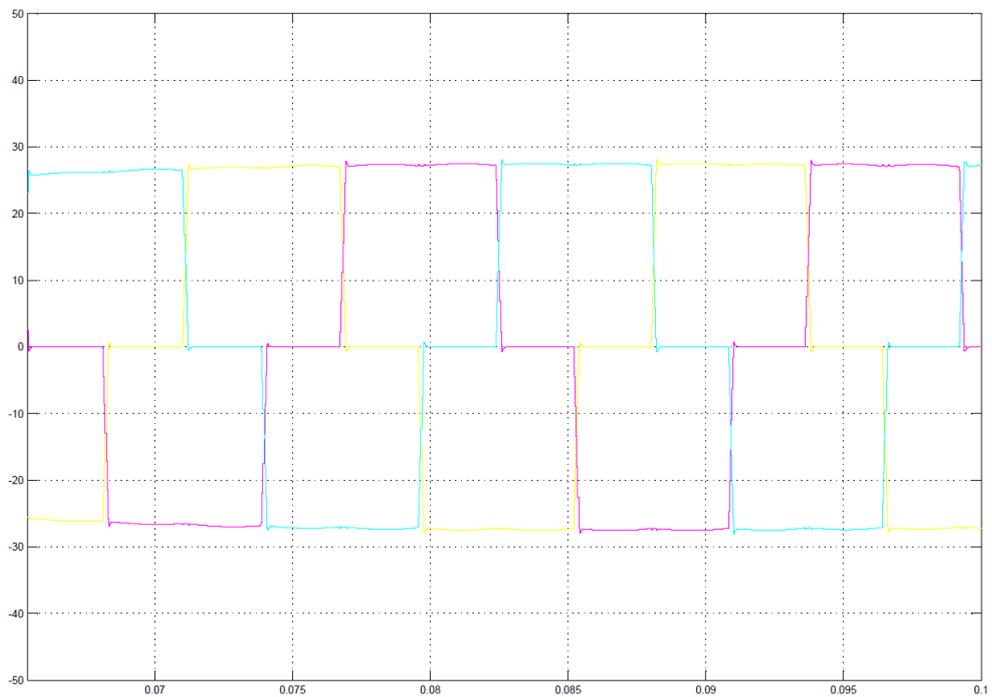


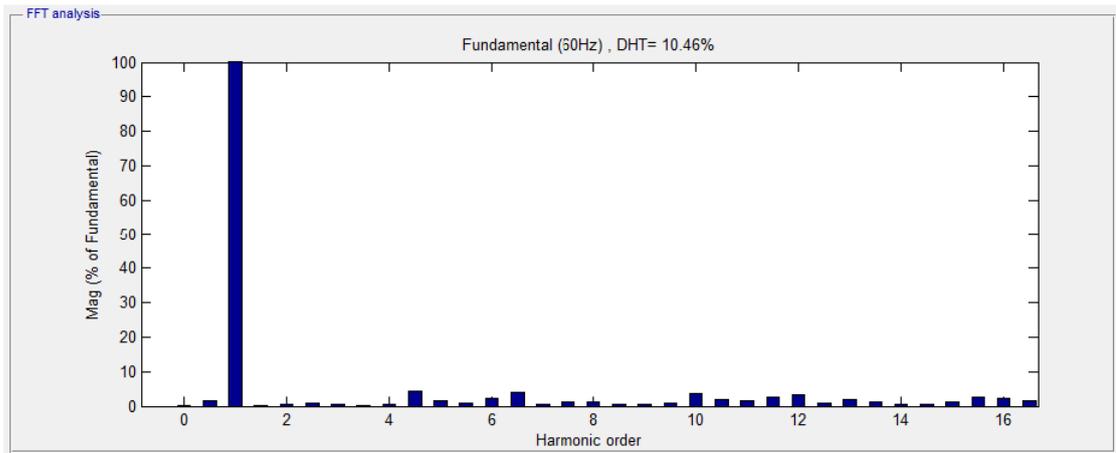
Figura 28 – Corrente do Conversor CA-CC Simulado



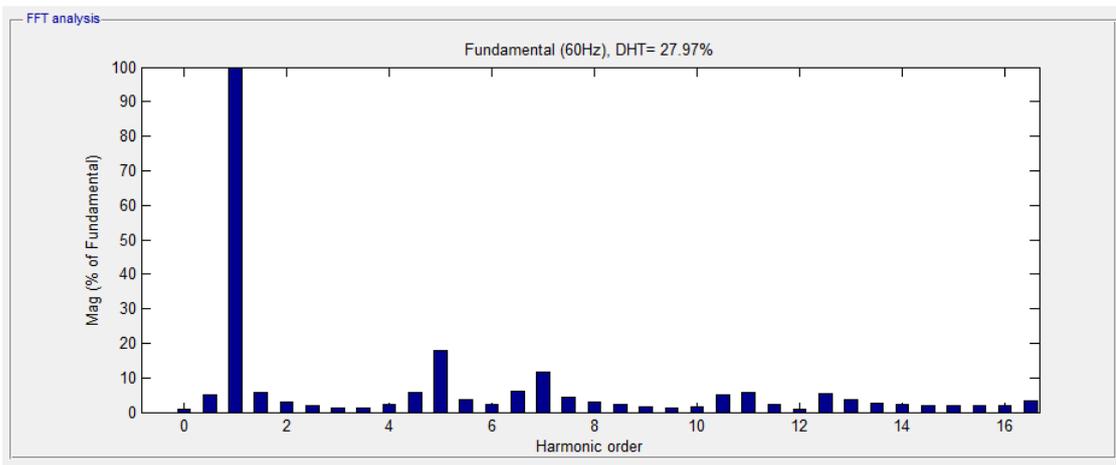
Na Figura 27 é visto o efeito do *overlap*, que é a comutação dos tiristores de um mesmo ramo em um mesmo período de tempo. Esse efeito voltará a ser discutido no Capítulo 5.

A DHI de tensão e corrente na entrada do conversor são vistos na Figura 29.

Figura 29 – DHI de (a)Tensão e (b)Corrente do Conversor CA-CC Simulado



(a)



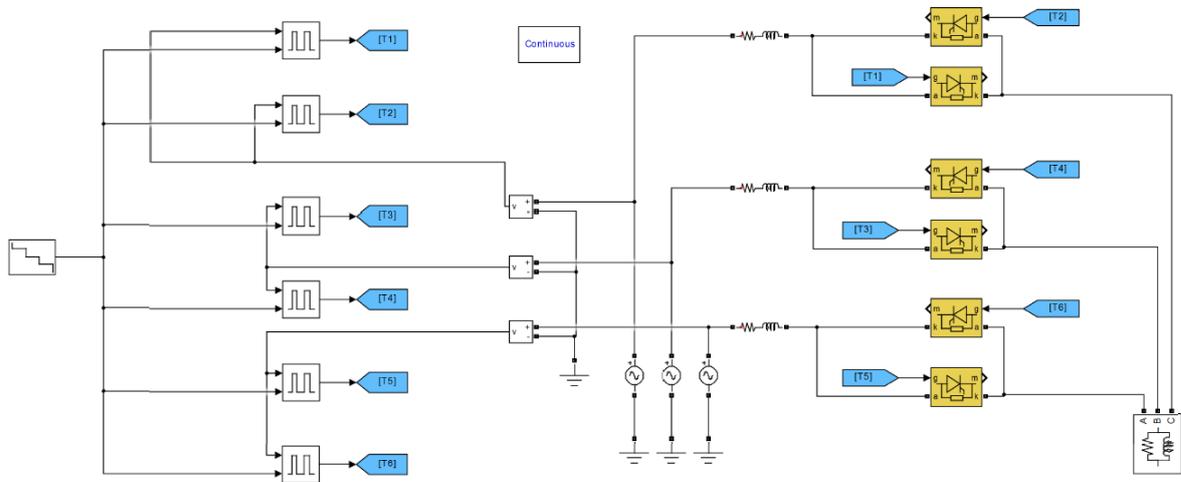
(b)

Como visto na Figura 29, para esse conversor ocorre a predominância de harmônicos de ordem $6n \pm 1$ ($n=1,2,3,\dots$) tanto para a tensão como para a corrente.

4.3.2 CA-CA

O conversor CA-CA implementado é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Conversor CA-CA *SIMULINK*®

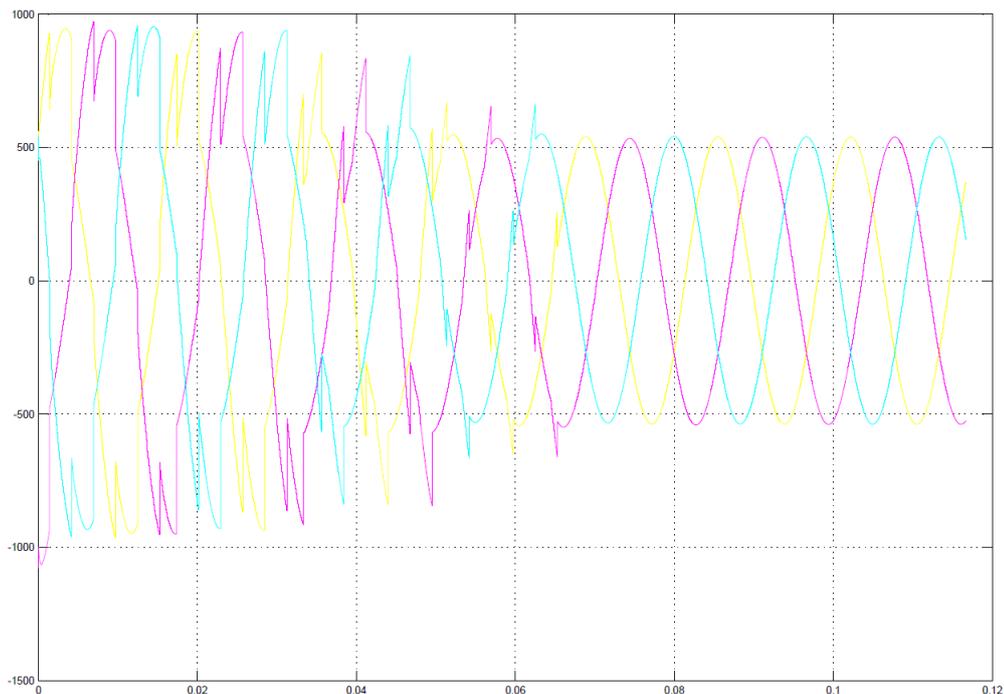


Nesta simulação, os pulsos em sincronismo com a rede são aplicados aos tiristores de forma a produzir ângulos de disparo que levam ao aumento gradativo da tensão na carga ($90^\circ, 75^\circ, 50^\circ, 30^\circ, 5^\circ$), essa condição se aproxima ao funcionamento de um *Soft Starter*.

A carga simulada se constitui de uma associação RL ligada em delta a qual consome 184kW e 89kVAR. Os níveis de tensão envolvidos são os mesmos do caso real apresentado no Capítulo 5.

A tensão e corrente na entrada do conversor para as condições apresentadas são vistas nas Figuras 31 e 32.

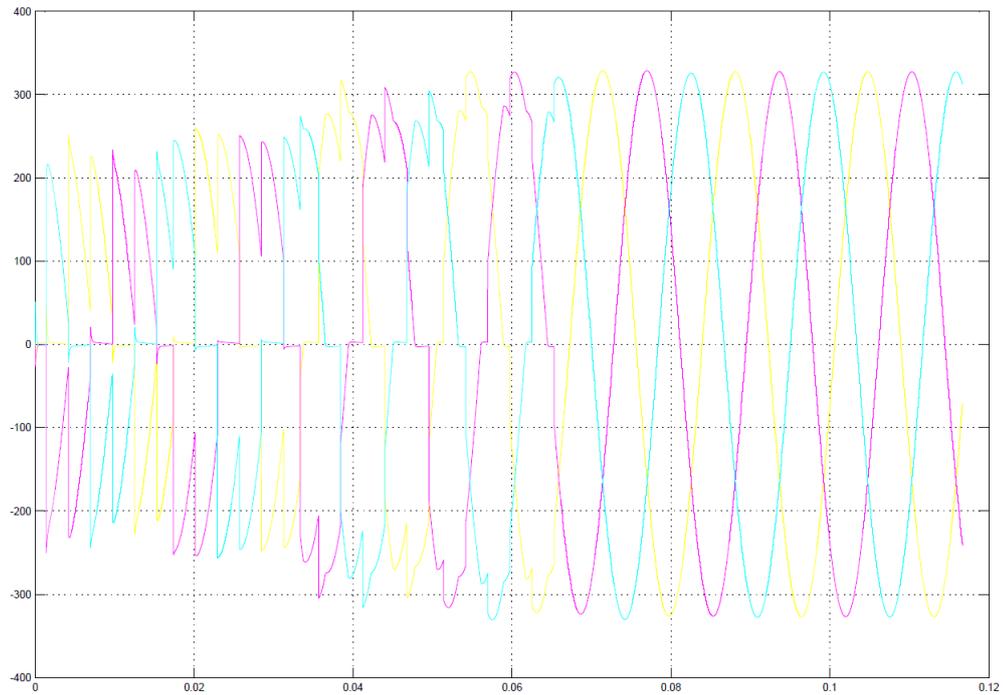
Figura 31 – Tensão do Conversor CA-CA Simulado



As três condições de ângulo de disparo mostram que, para a tensão, quanto menor

o ângulo de disparo mais a forma de onda se aproxima de uma senoide pura.

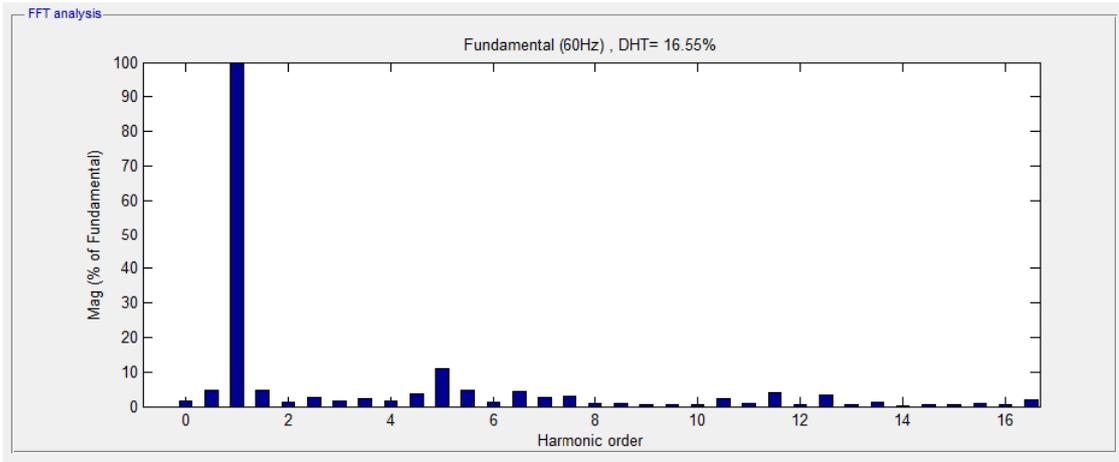
Figura 32 – Corrente do Conversor CA-CA Simulado



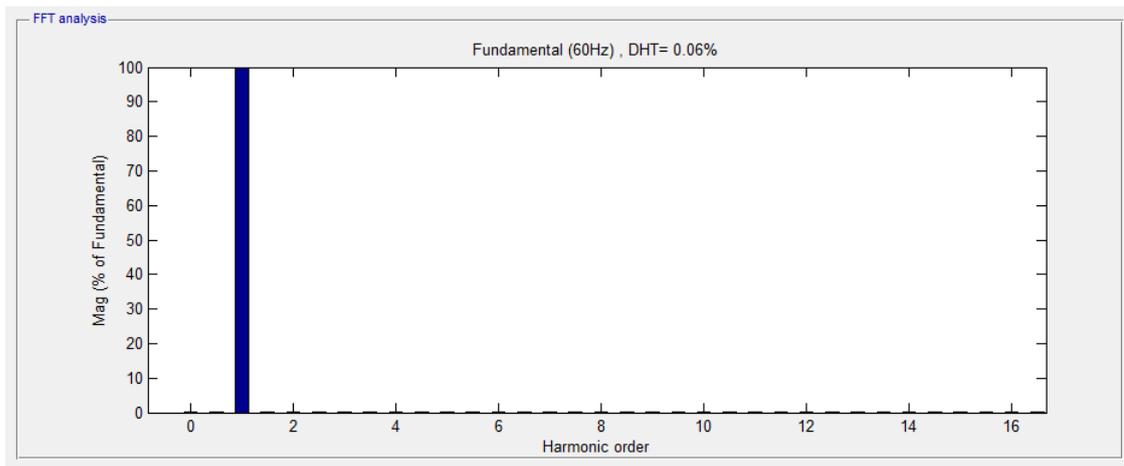
As considerações feitas acerca da forma de onda em relação ao ângulo de disparo para a tensão são também aplicadas para a corrente.

As Figuras 33 e 34 apresentam o conteúdo harmônico de tensão e corrente para um ângulo de condução de 90° e para o ângulo de condução máxima (5° - forma de onda senoidal), respectivamente.

Figura 33 – DHI de Tensão para o Ângulo de (a)90° e (b)5°



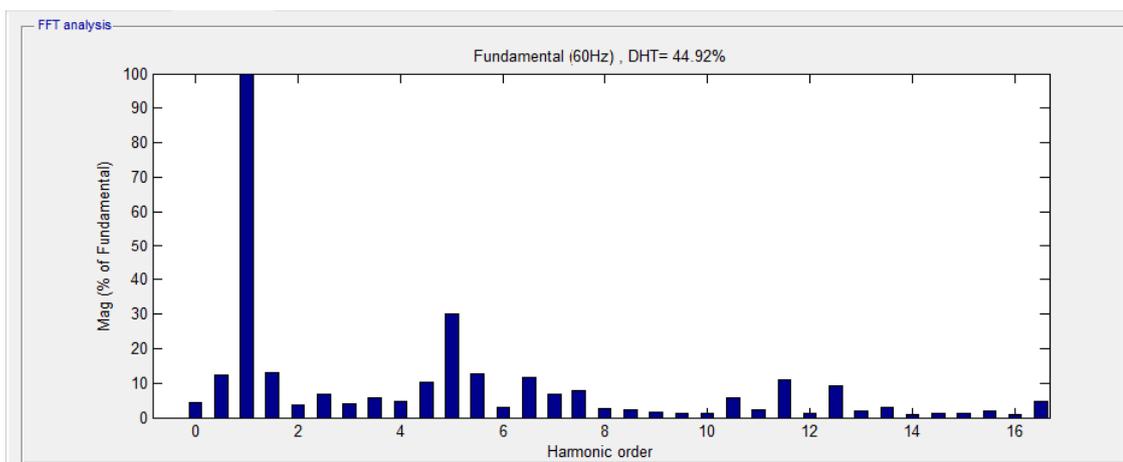
(a)



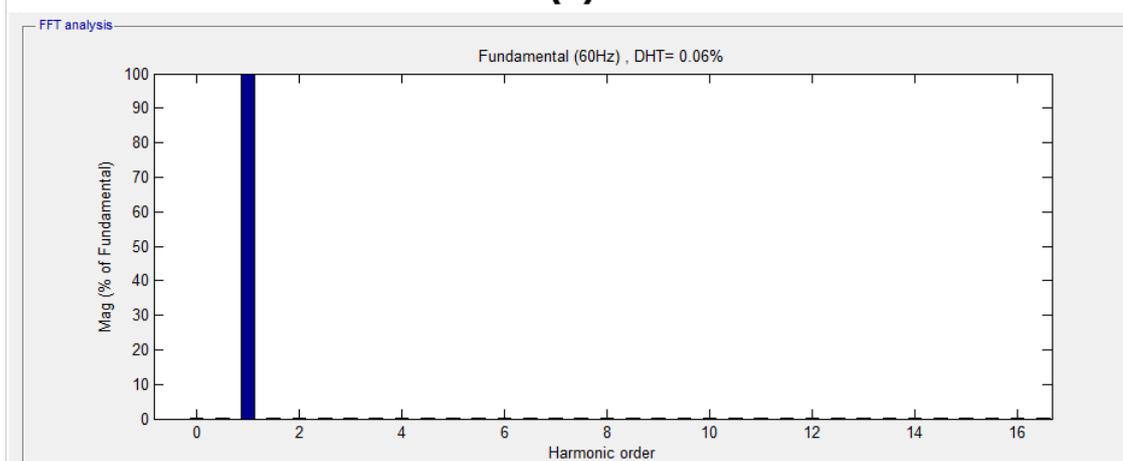
(b)

Assim como no conversor CA-CC, ocorre a predominância de harmônicos de ordem $6n \pm 1$ ($n=1,2,3,\dots$) tanto para a tensão, como para a corrente. Em relação ao período de condução, a DHT de tensão com o ângulo de disparo de 90° alcança 16,82%, sendo reduzida à 0,05% com o ângulo de condução máxima. Para a corrente, a DHT com o ângulo de disparo de 90° alcança 48,82%, sendo reduzida à 0,06% para o ângulo de condução máxima.

Figura 34 – DHI de Corrente para o Ângulo de (a) 90° e (b) 5°



(a)

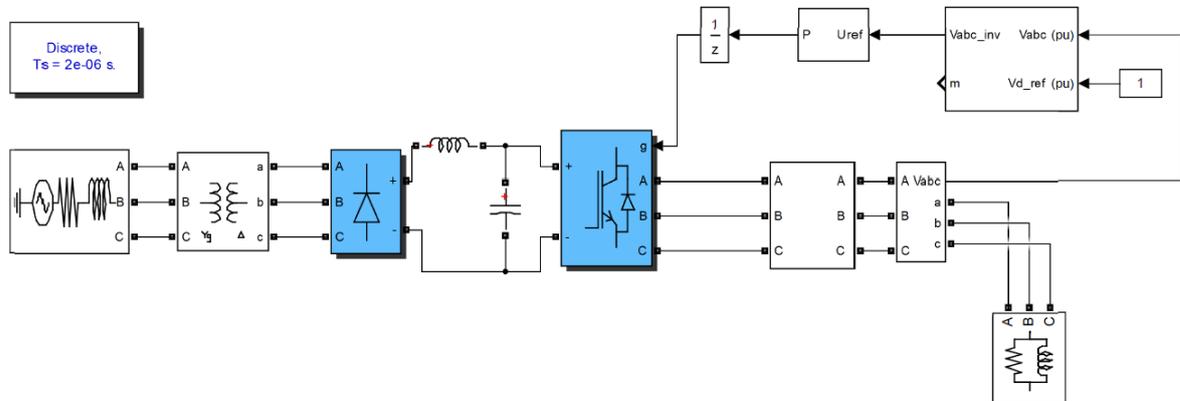


(b)

4.3.3 CC-CA

O conversor CC-CA apresentado na Figura 35 se trata do exemplo POWER_BRIDGES presente no *SIMULINK*®.

Figura 35 – Conversor CC-CA *SIMULINK*®



Nesta simulação, a tensão trifásica alternada da rede é retificada e filtrada, para então ser convertida para a tensão alternada controlável. O conversor utiliza modulação PWM de 2kHz para o chaveamento dos IGBT's. A tensão na carga é controlada por um controlador PI ao qual se utiliza da transformação ABC/DQ para correção dos pulsos de disparo. A carga utilizada na simulação têm os mesmos parâmetros da utilizada no conversor CA-CA.

A tensão e corrente na entrada do conversor são vistos nas Figuras 36 e 37.

Figura 36 – Tensão do Conversor CC-CA Simulado

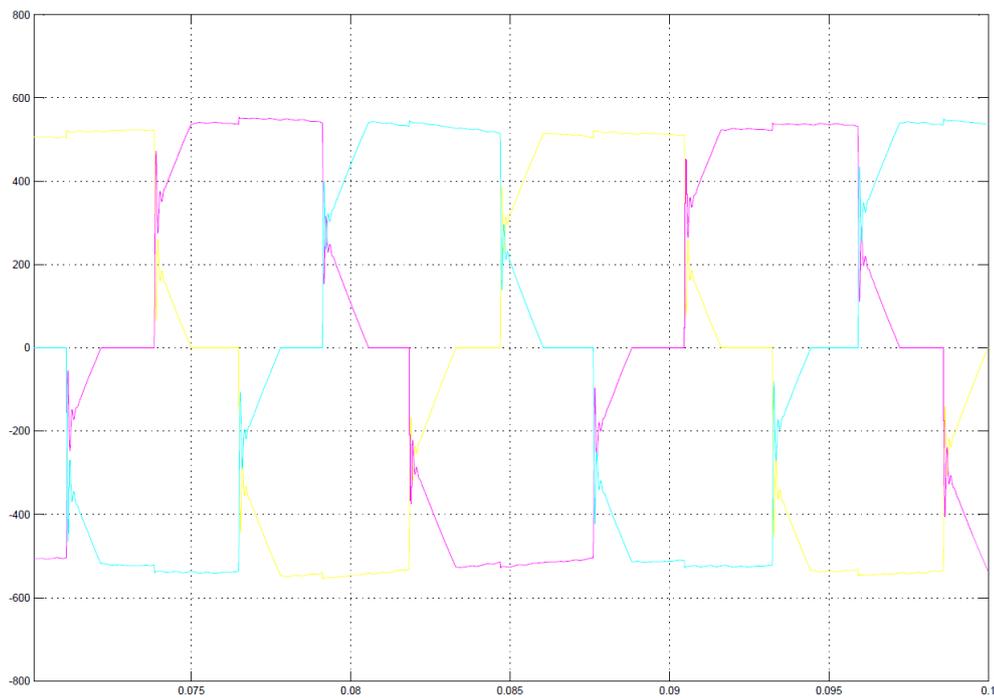
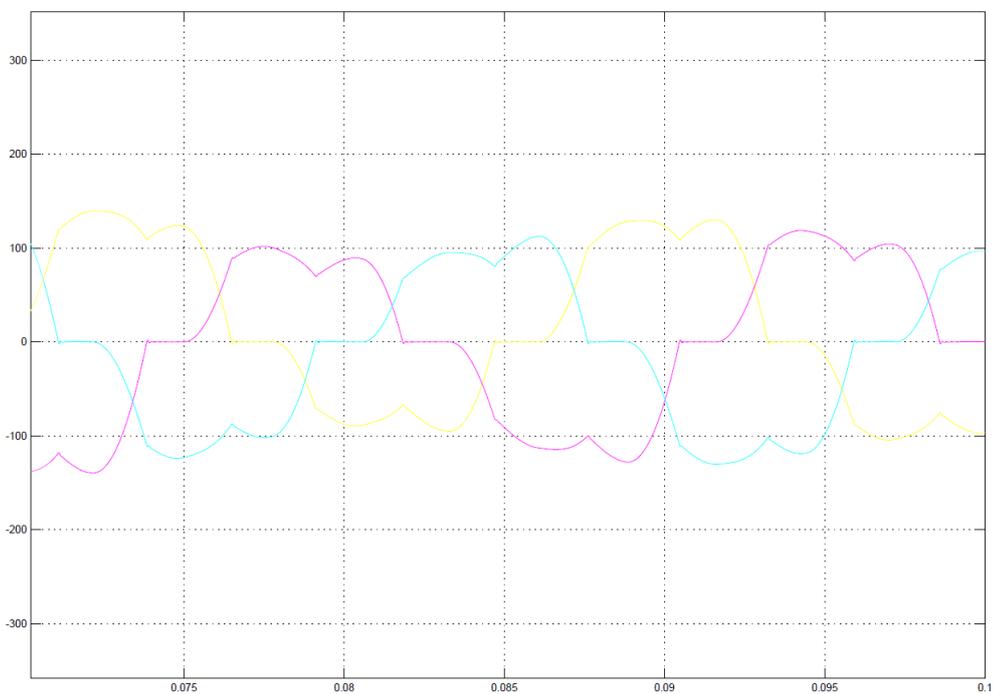
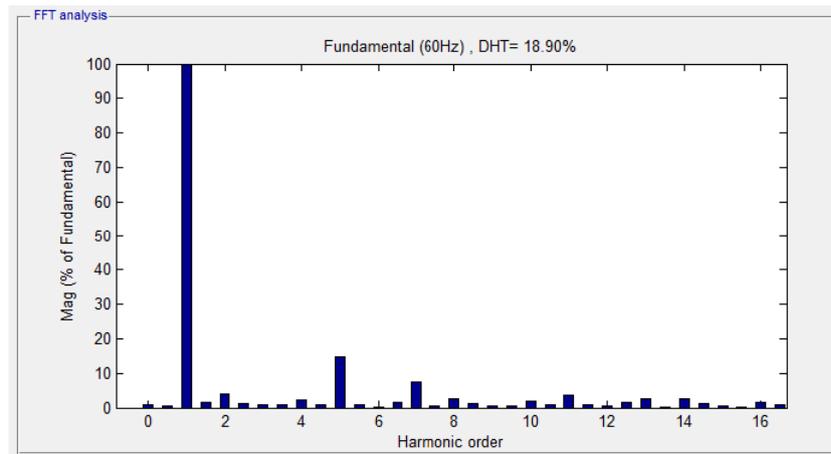


Figura 37 – Corrente do Conversor CC-CA Simulado

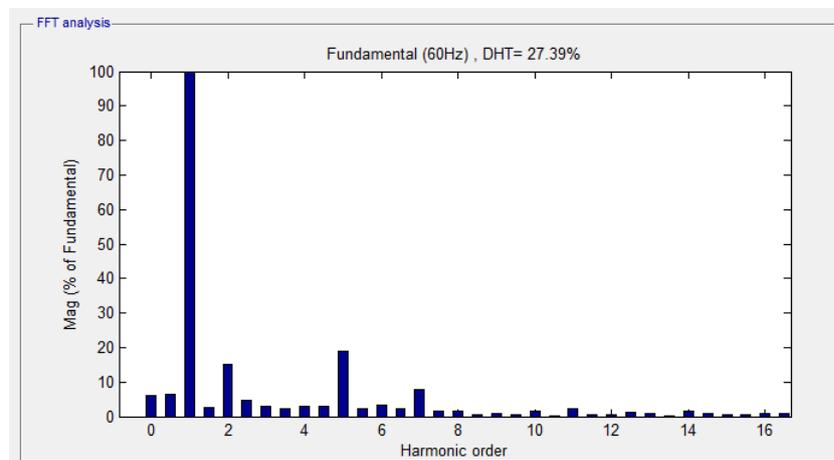


A DIT de tensão e corrente na entrada do conversor são vistos na Figura 38.

Figura 38 – DHI de (a)Tensão e (b)Corrente do Conversor CC-CA Simulado



(a)



(b)

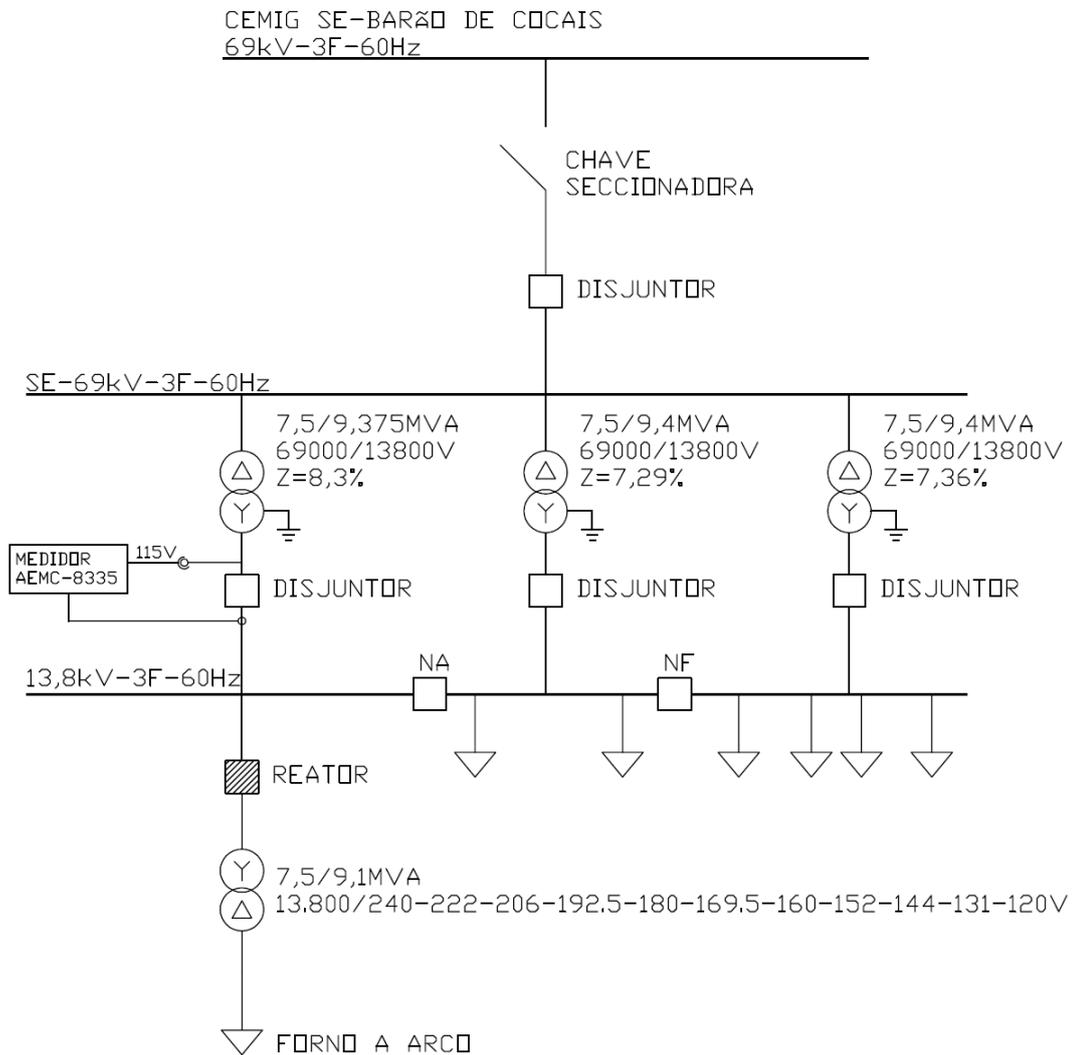
Assim como nos conversores apresentados anteriormente, o conteúdo harmônico possui predominância das ordens $6n \pm 1$ ($n=1,2,3,\dots$).

5 Resultados

5.1 Forno a Arco Elétrico

O diagrama unifilar que representa o circuito de alimentação do forno é visto na Figura 39.

Figura 39 – Diagrama Unifilar da Alimentação do Forno a Arco



O ramo de alimentação é composto por um reator de 5 *tap*'s e um transformador de 11 *tap*'s. A Figura 40 mostra a disposição desses equipamentos no ambiente industrial.

Figura 40 – Reator e Transformador do Forno a Arco



O reator limita a potência de curto-circuito do forno, resultando em menor queda de tensão no alimentador e ajuda na estabilização do arco, o que reduz o desgaste nos eletrodos (FILHO, 2015).

No final do circuito encontram-se os eletrodos do forno. Esses equipamentos são blocos cilíndricos de grafite e constituem o elemento de maior desgaste no forno, pois é neles que o arco é formado. É visto na Figura 41 a disposição desses elementos em ambiente industrial.

Figura 41 – Eletrodos do Forno a Arco



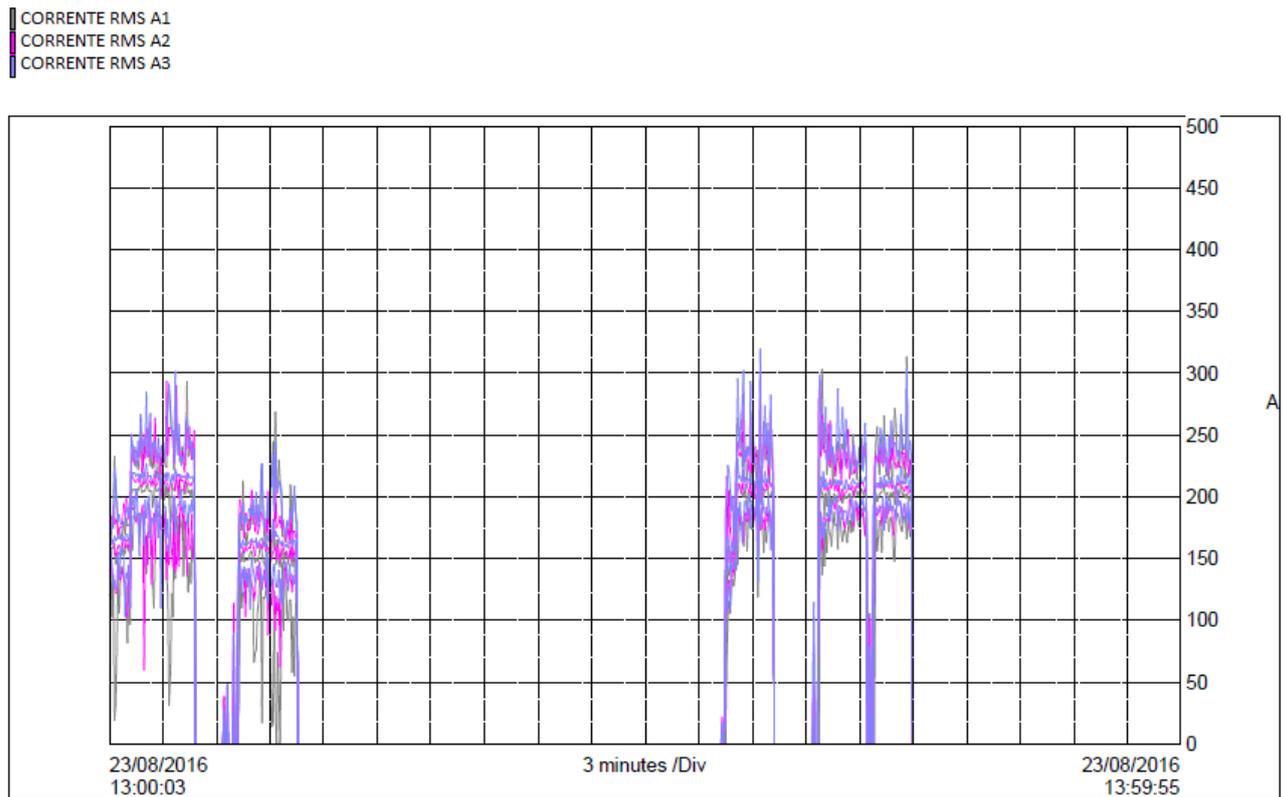
5.1.1 Regime de Operação

O forno monitorado opera com o valor de reatância do reator fixa, ou seja, sem a troca de *tap's*. A intensidade do arco é controlada pela variação dos *tap'* do trafo, em que a escolha de qual usar varia em função de análises químicas do aço derretido.

5.1.2 Resultados

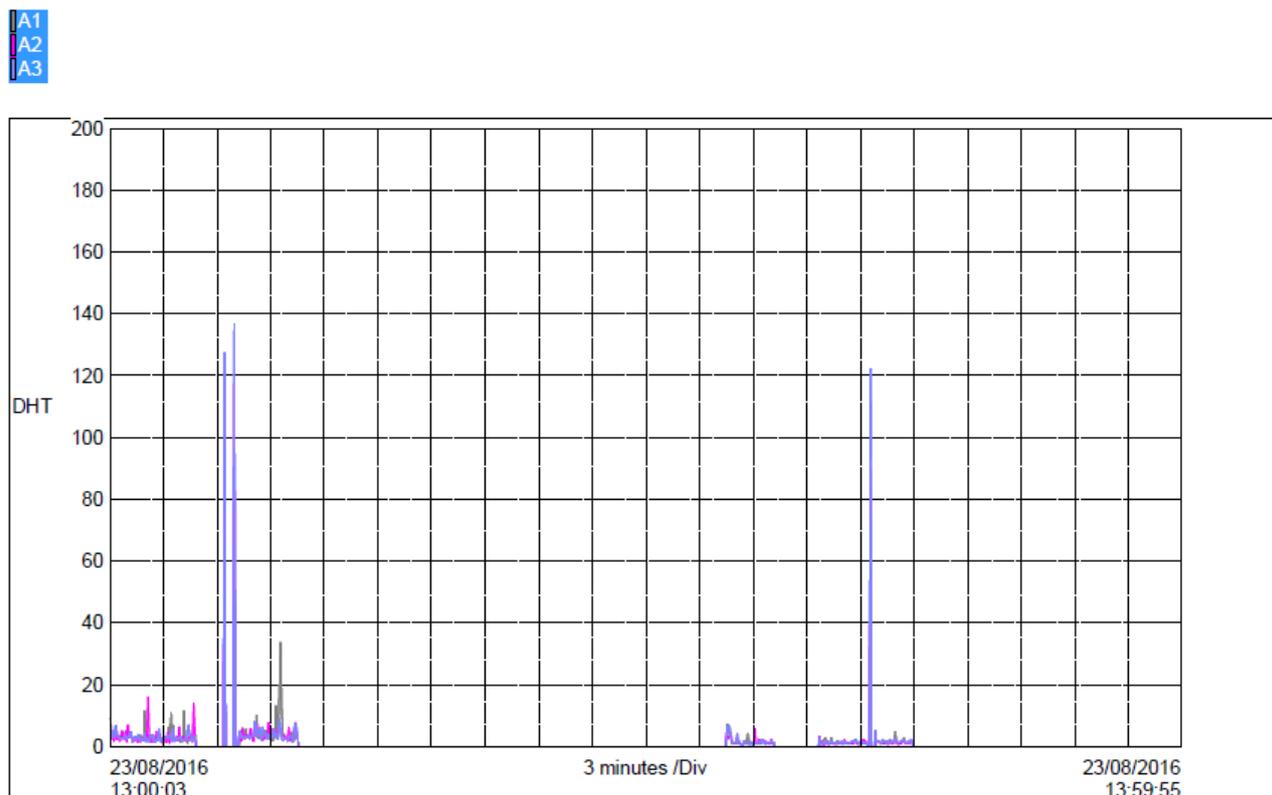
As oscilações do arco elétrico formado entre os eletrodos e a carga no forno provocam uma aleatoriedade muito grande na forma e amplitude de corrente. A Figura 42 ilustra esse comportamento.

Figura 42 – Corrente RMS Gravada - Forno a Arco



Assim como para a corrente, as oscilações no arco fazem com que surjam também distorções harmônicas de corrente de forma aleatória como mostra a Figura 43.

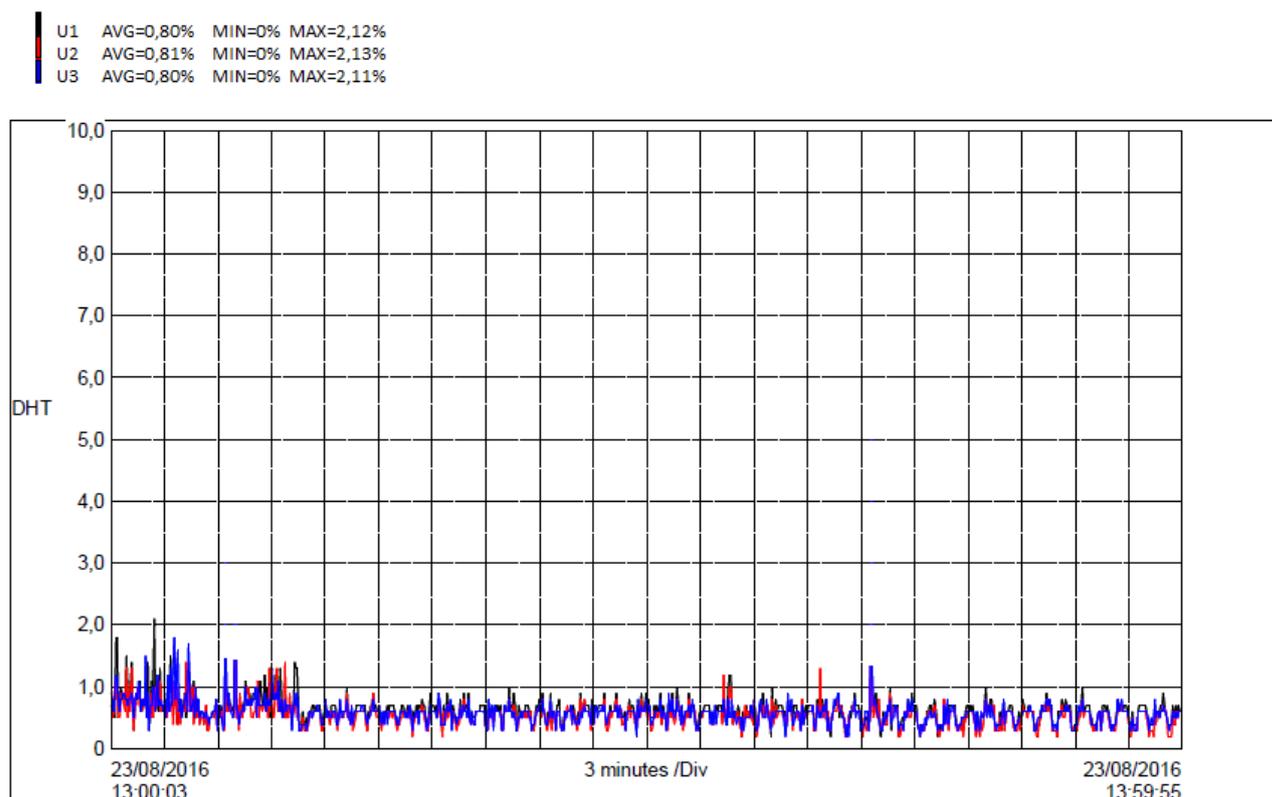
Figura 43 – DHT de Corrente Gravada - Forno a Arco



Uma elevada distorção de corrente faz com que, conseqüentemente, ocorra a distorção da tensão. Esse fato se dá devido à circulação destas correntes através da impedância do sistema.

Apesar da taxa de distorção harmônica de aproximadamente 120% da corrente na terceira e décima quinta divisão do gráfico, o seu efeito na tensão do sistema foi baixo, pois se trata de uma distorção em corrente com a mesma bem abaixo da corrente nominal (380A) conforme pode se observar no mesmo instante da Figura 42. Ou seja, ao circular pela impedância do sistema, a corrente não provocou distorções consideráveis na tensão, conforme pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 – DHT de Tensão Gravada - Forno a Arco



Apesar da distorção, pode se observar que em nenhum momento foi excedido o limite estabelecido pelo PRODIST que é de 6% de DHT para tensão de 13,8 kV.

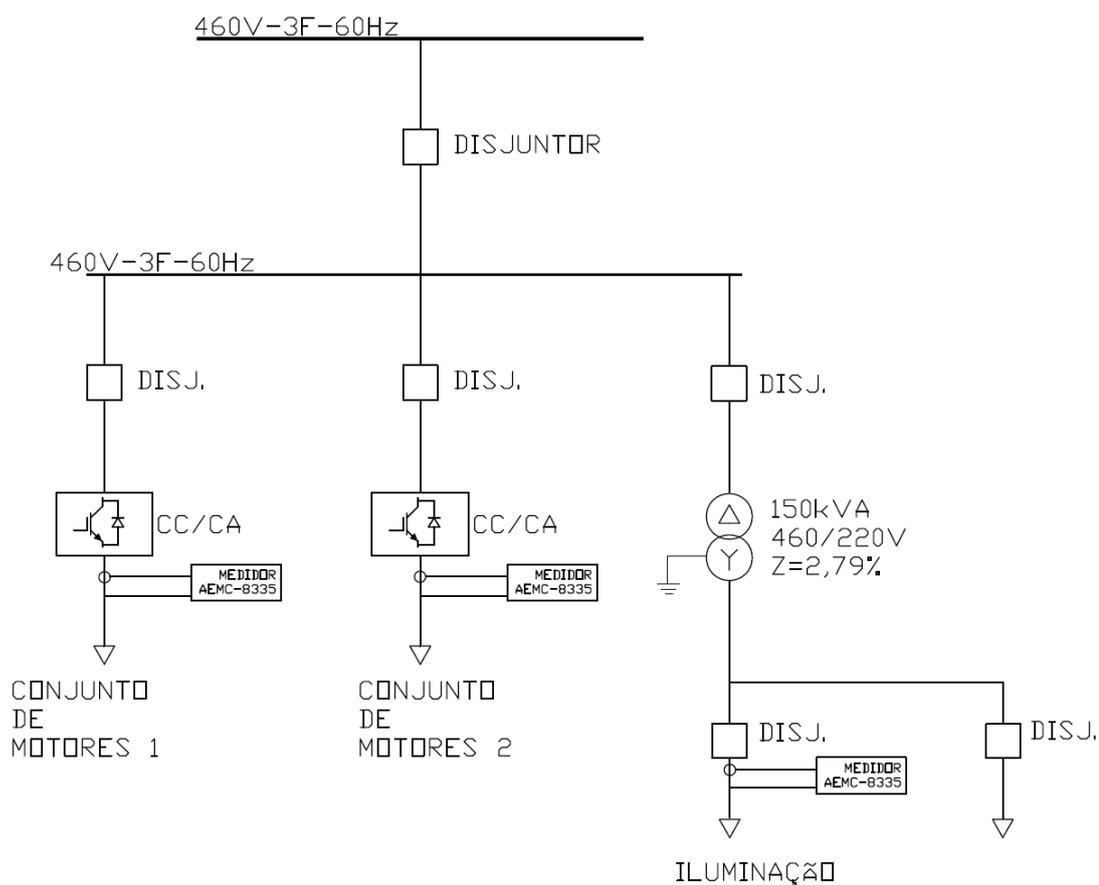
Algumas medidas são tomadas para atenuação das distorções harmônicas conforme Filho (2015), sendo na instalação monitorada encontradas as seguintes ações de mitigação:

- Alimentação exclusiva para suprimento do forno através de um transformador dedicado na subestação principal (Vide Figura 38).
- Instalação de reator série para atenuar as flutuações de tensão. Esse procedimento garante que o forno opere com arcos mais longos devido à característica indutiva do reator, garantindo assim uma operação mais estável aumentando também a vida útil dos eletrodos.

5.2 Iluminação

O diagrama unifilar que representa o circuito de alimentação da iluminação é visto na Figura 45.

Figura 45 – Diagrama Unifilar da Alimentação da Iluminação



A distribuição de lâmpadas entre as fases do sistema é feita conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Distribuição de Lâmpadas

| Iluminação | | | | Potência total (VA) | Potência por Fases (VA) | | |
|-------------------------|-------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------------|-------|------|
| Vapor de Sódio 480VA | 280VA | Mista 125VA | Foto Célula 50VA | | AB | AC | BC |
| 5 | | | | 2400 | 2400 | | |
| 5 | | | | 2400 | | 2400 | |
| 5 | | | | 2400 | | | 2400 |
| 5 | | | | 2400 | 2400 | | |
| 5 | | | | 2400 | | 2400 | |
| 5 | | | | 2400 | | | 2400 |
| 5 | | | | 2400 | 2400 | | |
| 5 | | | | 2400 | | 2400 | |
| 5 | | | | 2400 | | | 2400 |
| 5 | | | | 2400 | 2400 | | |
| 5 | | | | 2400 | | 2400 | |
| 5 | | | | 2400 | | | 2400 |
| 5 | | | | 2400 | 2400 | | |
| | | | 1 | 50 | 50 | | |
| | 6 | | | 1680 | | 1680 | |
| | | 14 | | 1750 | | 1750 | |
| Total | | | | 34680 | 12050 | 13030 | 9600 |

O quadro de distribuição em que se realizaram as medições e a instalação física das lâmpadas são vistas nas Figuras 46 e 47, respectivamente.

Figura 46 – Quadro de Distribuição de Cargas



Figura 47 – Distribuição Física de Lâmpadas



5.2.1 Regime de Operação

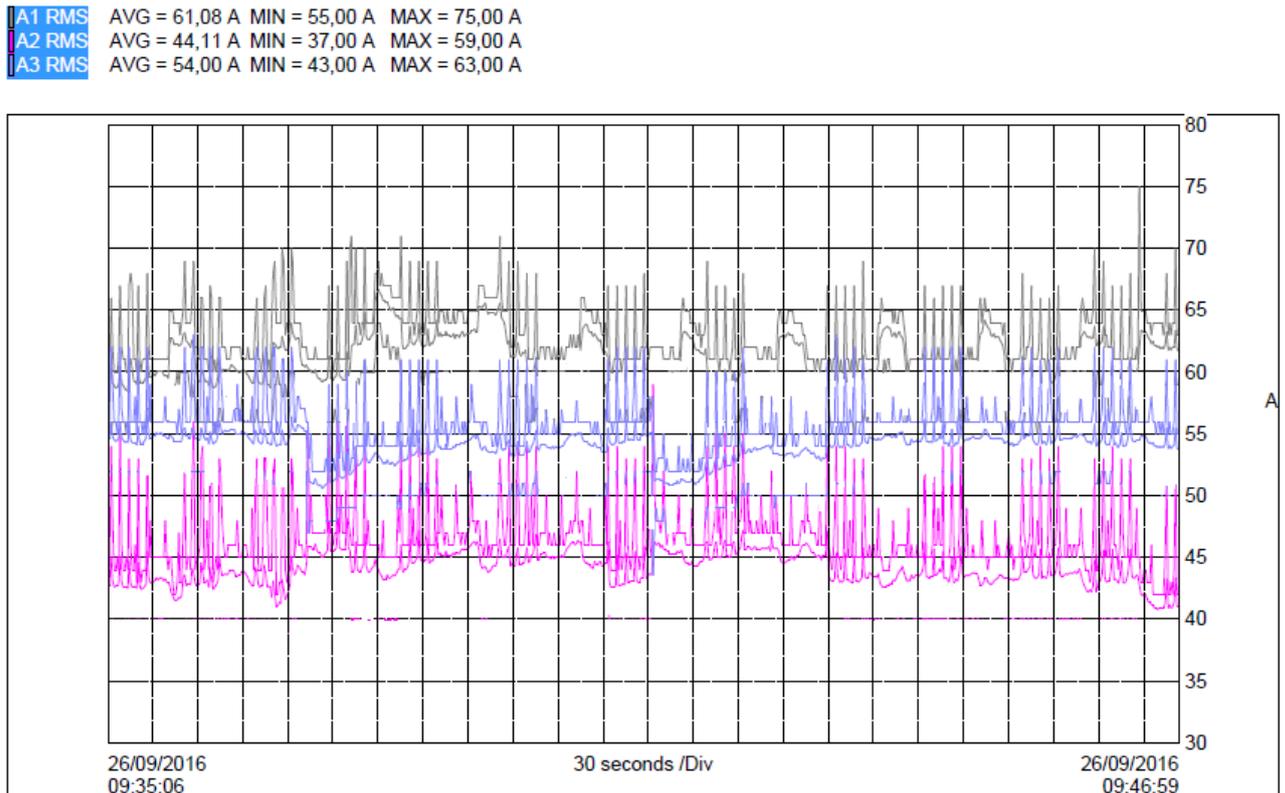
O sistema de iluminação monitorado possui predominância de lâmpadas de vapor de sódio e de vapor de mercúrio. O tipo de reator utilizado é o magnético e o modelo é o VTE 400A26 HPI 400W/220V da PHILIPS.

O acionamento do circuito monitorado é realizado, de forma total, através de fotocélulas. Visto a claridade constante do ambiente, o monitoramento se deu sem o chaveamento de lâmpadas, ou seja, em regime permanente.

5.2.2 Resultados

Ao analisar a corrente de alimentação do circuito de iluminação, conforme Figura 48, pode se verificar o desequilíbrio entre as fases. Isso ocorre porque apesar das cargas estarem distribuídas entre as fases, algumas lâmpadas foram substituídas por lâmpadas de maior potência ou mesmo a algumas delas estarem queimadas.

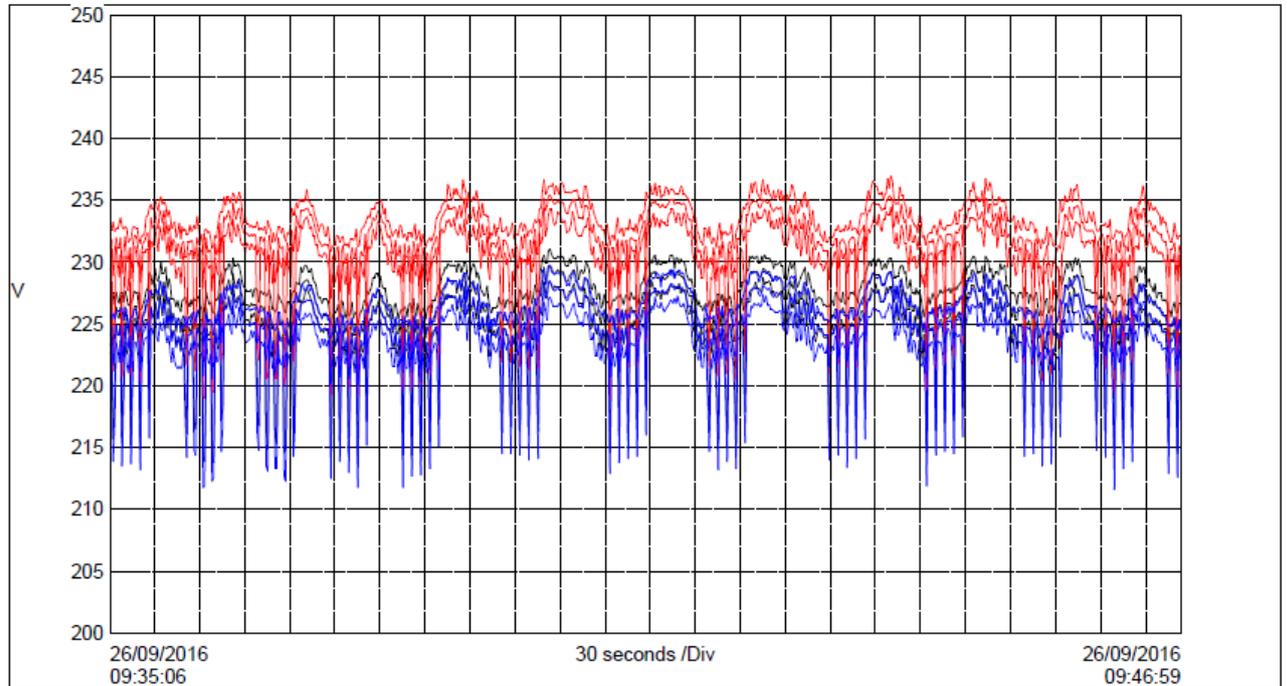
Figura 48 – Corrente RMS Gravada - Iluminação



Outro fato a se observar são os picos de corrente que ocorreram de forma periódica durante a medição. Pode se observar que, conforme a Figura 49, ocorrem, no mesmo período, quedas de tensão no barramento de alimentação das lâmpadas. Estas quedas periódicas de tensão se dão devido a um outro equipamento presente no mesmo barramento de alimentação, a tesoura C41 alimentada por um conversor CA-CC, que será detalhado mais adiante. A queda de tensão momentânea faz com que as lâmpadas sejam alimentadas pelo capacitor existente no circuito de partida (Vide Figura 5). A corrente do capacitor se soma com a corrente de linha e se estabiliza após o afundamento.

Figura 49 – Tensão RMS Gravada - Iluminação

| | | | |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| U1 RMS | AVG = 226,4 V | MIN = 213,7 V | MAX = 231,1 V |
| U2 RMS | AVG = 232,2 V | MIN = 219,0 V | MAX = 237,0 V |
| U3 RMS | AVG = 225,1 V | MIN = 211,6 V | MAX = 229,7 V |



Analisando o gráfico de distorção harmônica de corrente na Figura 50, pode-se verificar que a taxa de distorção média fica em torno de 30%, caracterizado, com mais intensidade pelos harmônicos de 5^a e 7^a ordem vistos na Figura 51.

O efeito da queda de tensão momentânea causada pelo conversor CA-CC que alimenta a tesoura C41, equipamento que será analisado mais adiante, faz também com que as taxas de distorção harmônicas sejam mais altas, já que a variação da corrente é considerável neste momento.

Figura 50 – DHT de Corrente Gravada - Iluminação

| | | | |
|----|---------------|---------------|---------------|
| A1 | AVG = 24,48 % | MIN = 18,00 % | MAX = 58,40 % |
| A2 | AVG = 30,58 % | MIN = 23,40 % | MAX = 54,10 % |
| A3 | AVG = 25,64 % | MIN = 19,60 % | MAX = 64,90 % |

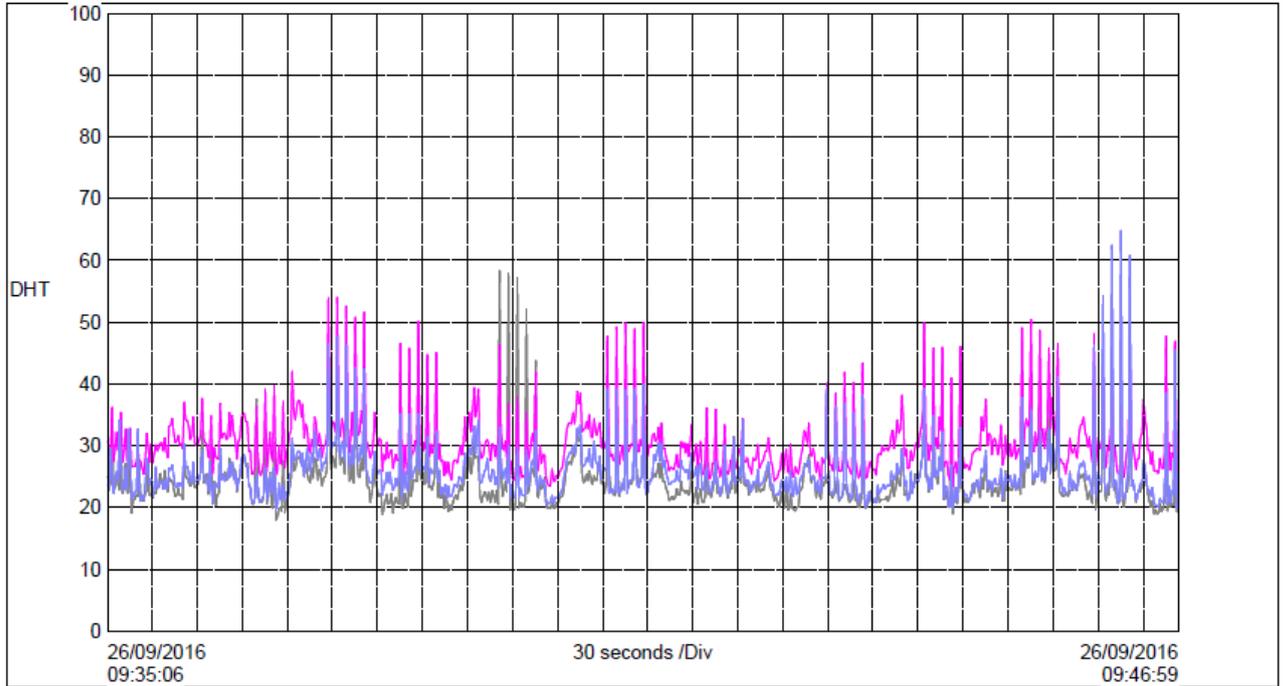
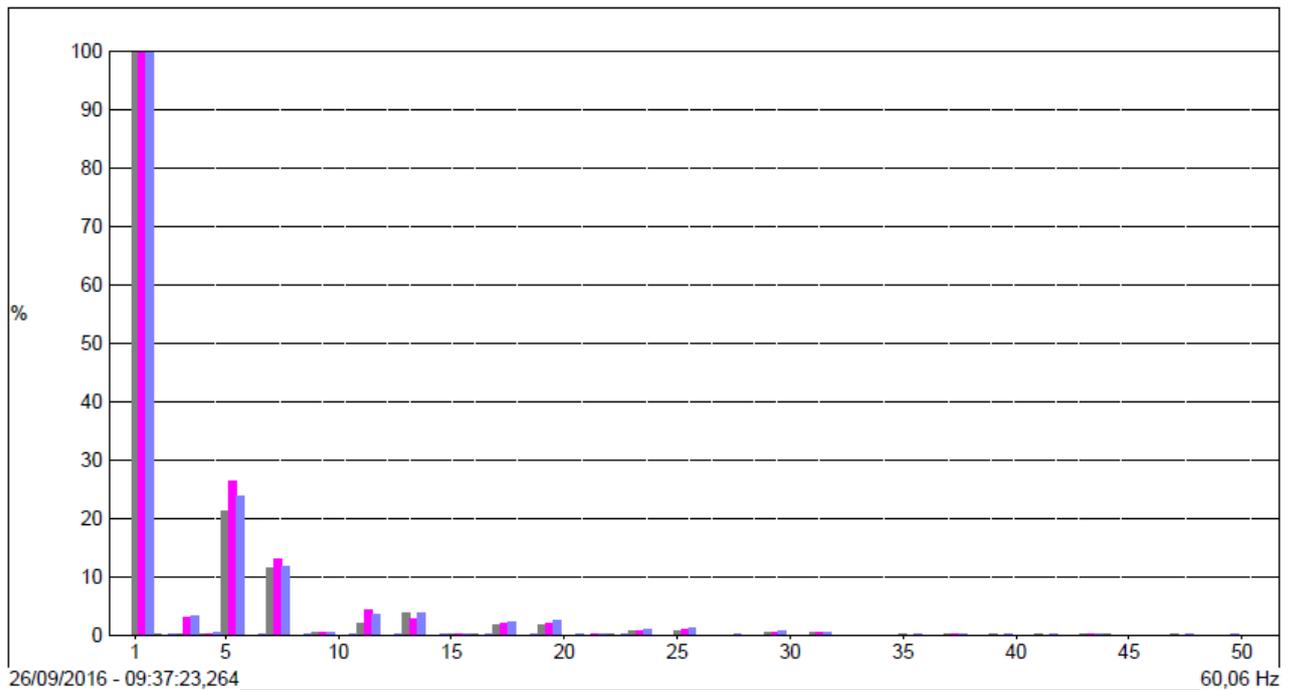


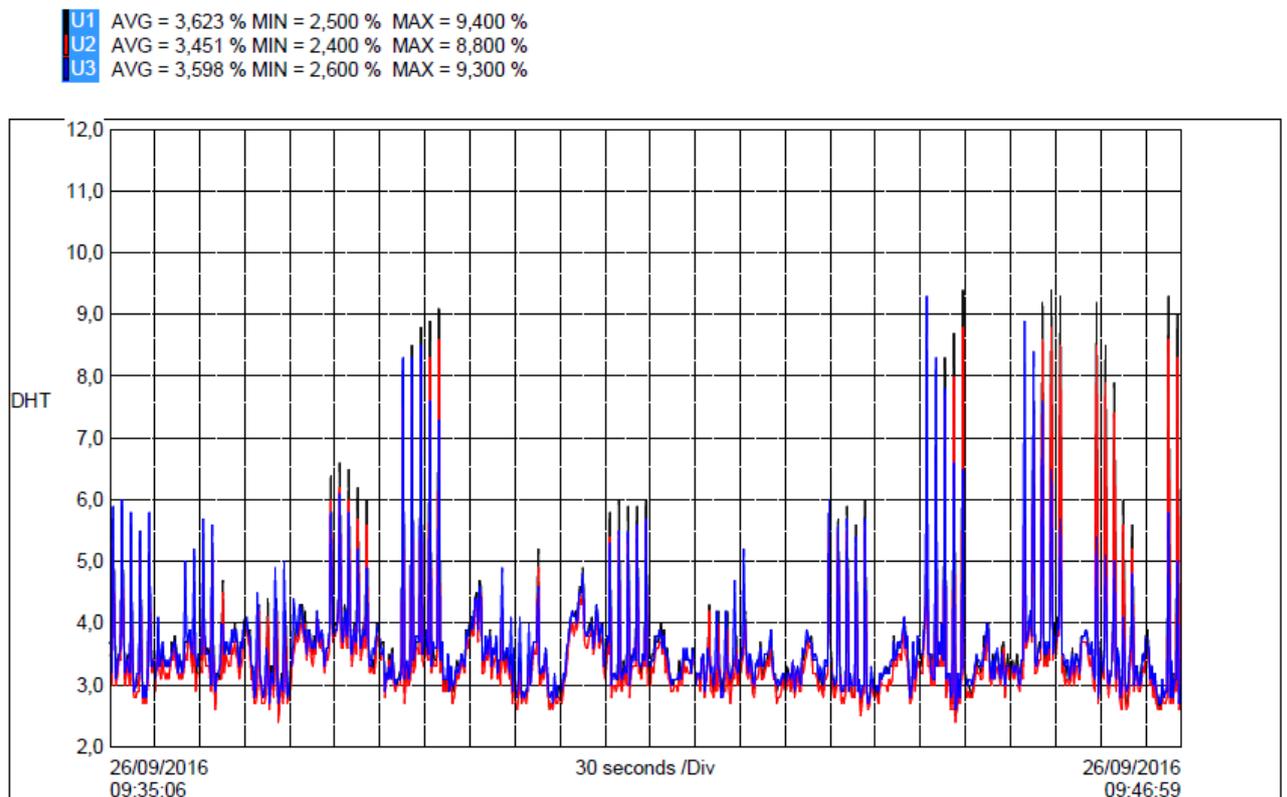
Figura 51 – DHI de Corrente Instantânea - Iluminação

| | | | |
|----|---------------|------------------|-----------------|
| A1 | RMS = 60,04 A | Peak- = -97,40 A | Peak+ = 94,40 A |
| A2 | RMS = 45,75 A | Peak- = -76,10 A | Peak+ = 73,10 A |
| A3 | RMS = 51,14 A | Peak- = -80,70 A | Peak+ = 77,60 A |



A análise feita para as distorções de tensão na Figura 52 mostra claramente os picos originados do conversor CA-CC, chegando a quase 9,5%, sendo o limite estabelecido pelo PRODIST de 10% para tensões até 1 kV. No regime normal de trabalho, a considerar apenas o sistema de iluminação sem grandes influências externas, a distorção de corrente, apesar de possuir uma DHT considerável, possui um baixo valor RMS. Sendo assim, ao circular pela impedância do sistema, a corrente gera pouco impacto na taxa de distorção de tensão, chegando em média a 3,5%.

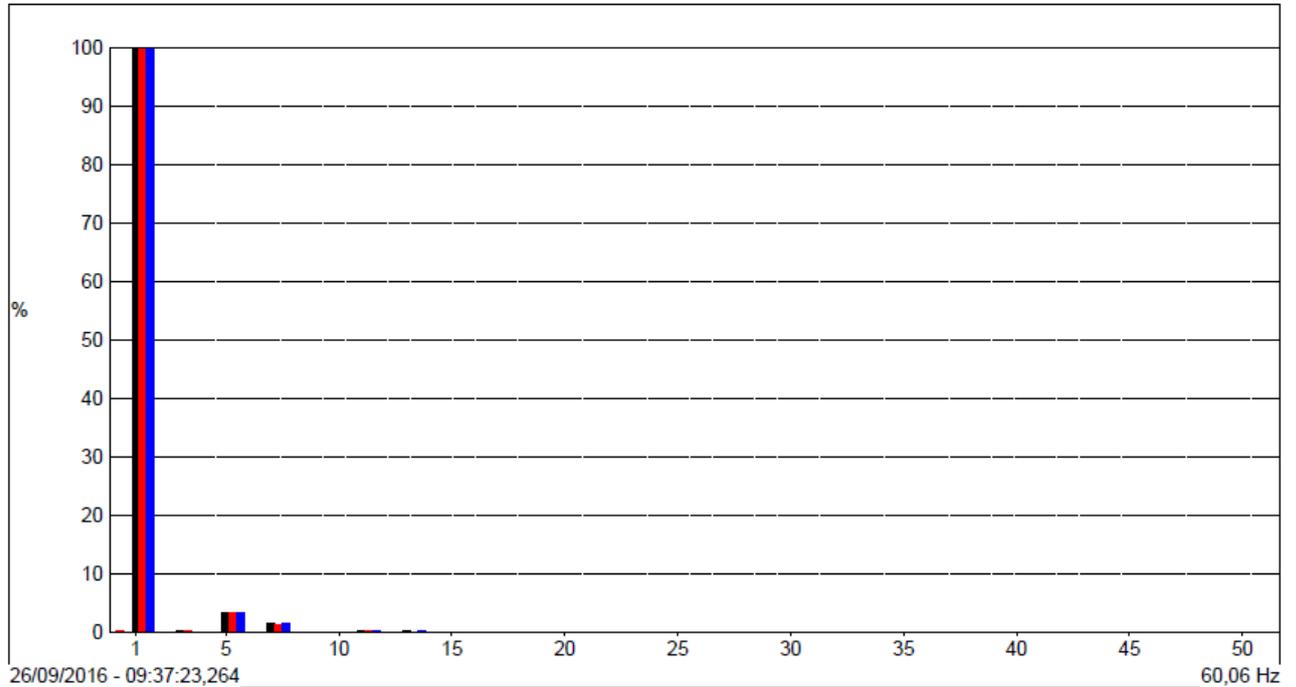
Figura 52 – DHT de Tensão Gravada - Iluminação



Através da Figura 53 se pode observar as componentes harmônicas provenientes apenas do sistema de iluminação. Ou seja, durante a medição, o conversor CA-CC não se encontrava acionado.

Figura 53 – DHI de Tensão Instantânea - Iluminação

| | | | |
|----------|---------|------------------|-----------------|
| U1 RMS = | 227,2 V | Peak- = -317,9 V | Peak+ = 318,0 V |
| U2 RMS = | 233,1 V | Peak- = -322,3 V | Peak+ = 321,3 V |
| U3 RMS = | 226,1 V | Peak- = -314,6 V | Peak+ = 315,2 V |



O sistema de iluminação atende às normas quanto a DHT, sendo já implementadas no sistema medidas mitigadoras como distribuir as cargas de forma equilibrada e utilizar reatores magnéticos ao invés de eletrônicos.

5.3 Conversores

Os diagramas unifilares que representam a alimentação dos conversores são vistos nas Figuras 54 e 55.

Figura 54 – Diagrama Unifilar Conversores -Laminação

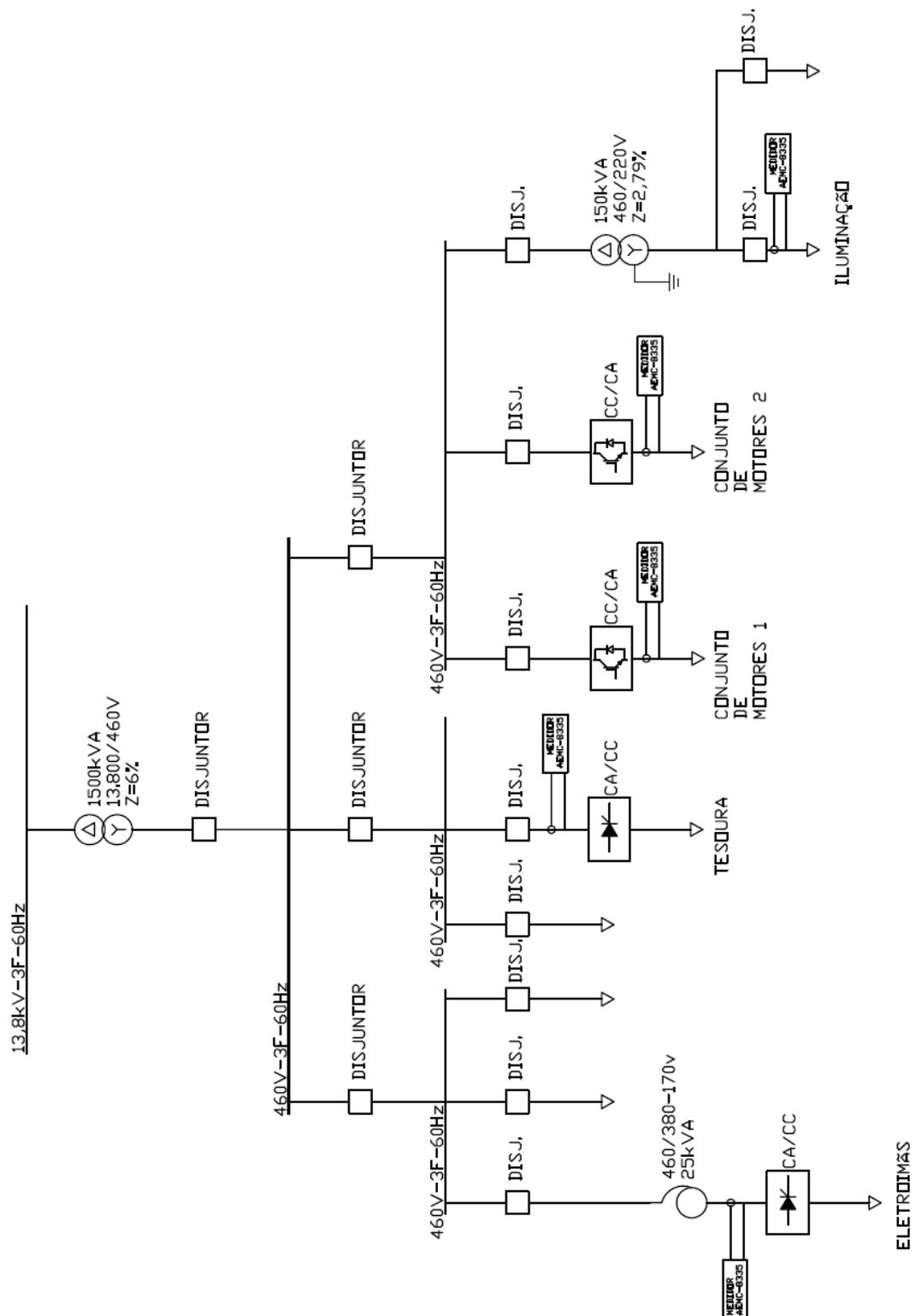
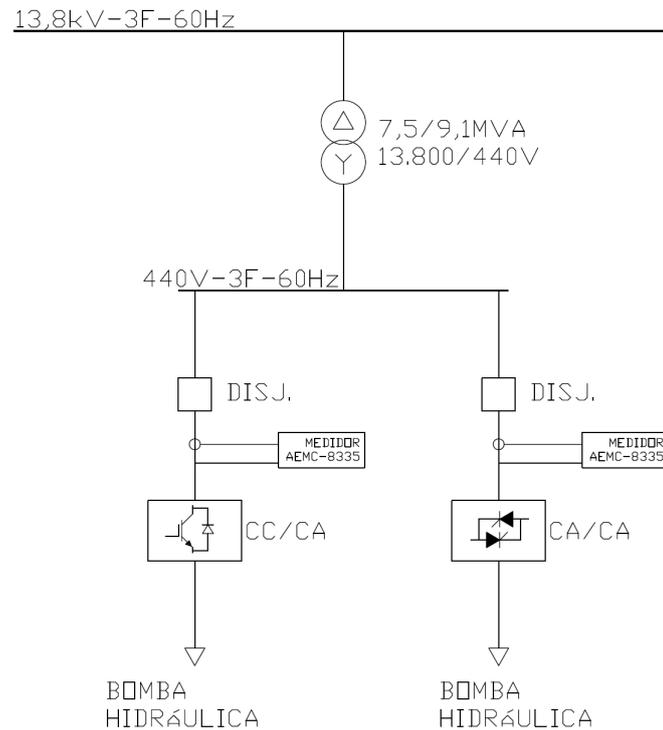


Figura 55 – Diagrama Unifilar Conversores -Utilidades



A representação é feita em dois diagramas pois os conversores monitorados se encontram em áreas distintas.

5.3.1 CA-CC

Foram analisados dois conversores CA-CC tiristorizados. O primeiro tem o seu funcionamento semelhante a um retificador não controlado, ou seja, entrega à carga a forma de onda completa de tensão retificada. O segundo realiza o controle do ângulo de disparo dos tiristores para aplicação da tensão na carga da forma que seja necessário para o regime de operação da carga.

5.3.1.1 CA-CC em Onda Completa

O conversor CA-CC em onda completa analisado foi o MAG-V da VARIXX.

Figura 56 – Conversor CA-CC MAG-V



(<http://www.varixx.com.br/>)

Esse conversor é de uso específico em eletroímãs e permite o controle de magnetização e desmagnetização. O seu esquema interno é semelhante ao da Figura 5, tendo a diferença de possuir dois conjuntos de 6 tiristores, um para magnetização e outro para desmagnetização.

A carga acionada é constituída de uma associação em paralelo de quatro eletroímãs com 5000W cada, a uma tensão de 220VCC.

Figura 57 – Eletroímãs



5.3.1.1.1 Regime de Operação

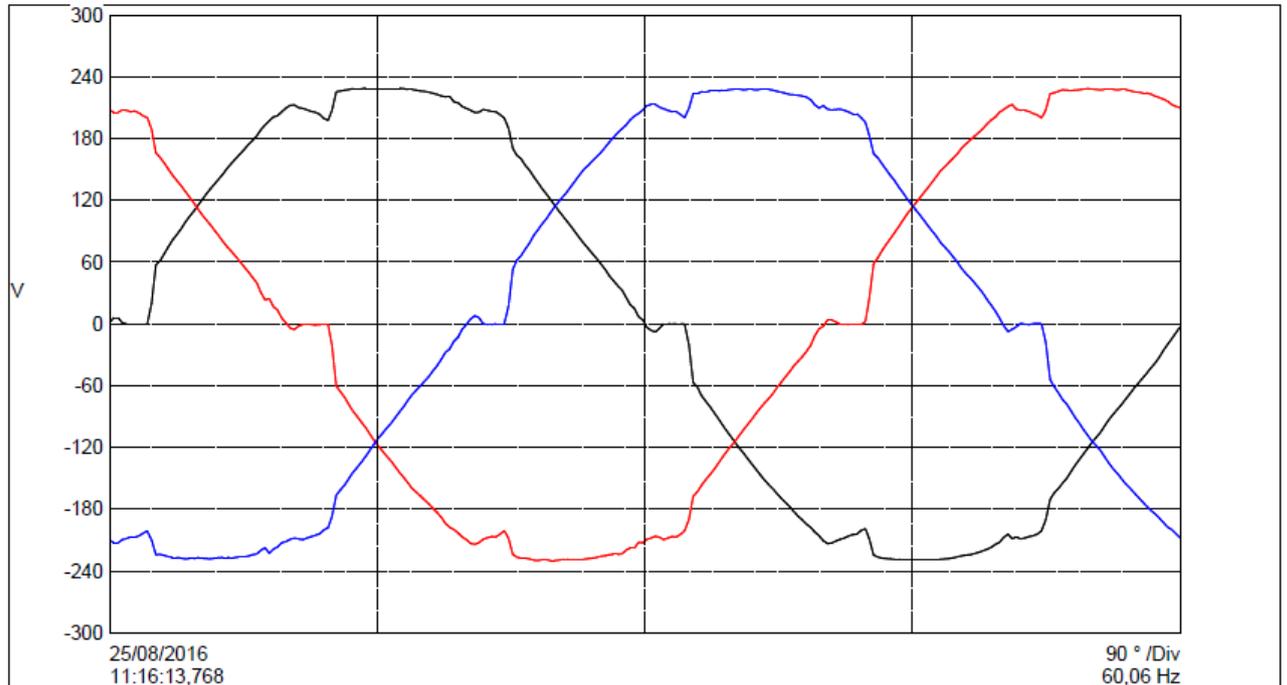
Para essa aplicação, o módulo de controle foi configurado de forma que os pulsos para os tiristores sejam dados na passagem por zero do sinal alternado de entrada. Esse procedimento faz com que os tiristores se comportem como diodos, conduzindo completamente o respectivo semi-ciclo da tensão de entrada.

5.3.1.1.2 Resultados

Por se tratar de uma carga RL predominantemente indutiva, pode se verificar, através da Figura 58, o efeito de *overlap*. Esse efeito se trata da condução simultânea de duas fases devido ao arraste de corrente que mantém o SCR conduzindo mesmo após a tensão ter passado pelo ponto zero da onda em cada semiciclo.

Figura 58 – Tensão RMS Instantânea - CA-CC não controlado

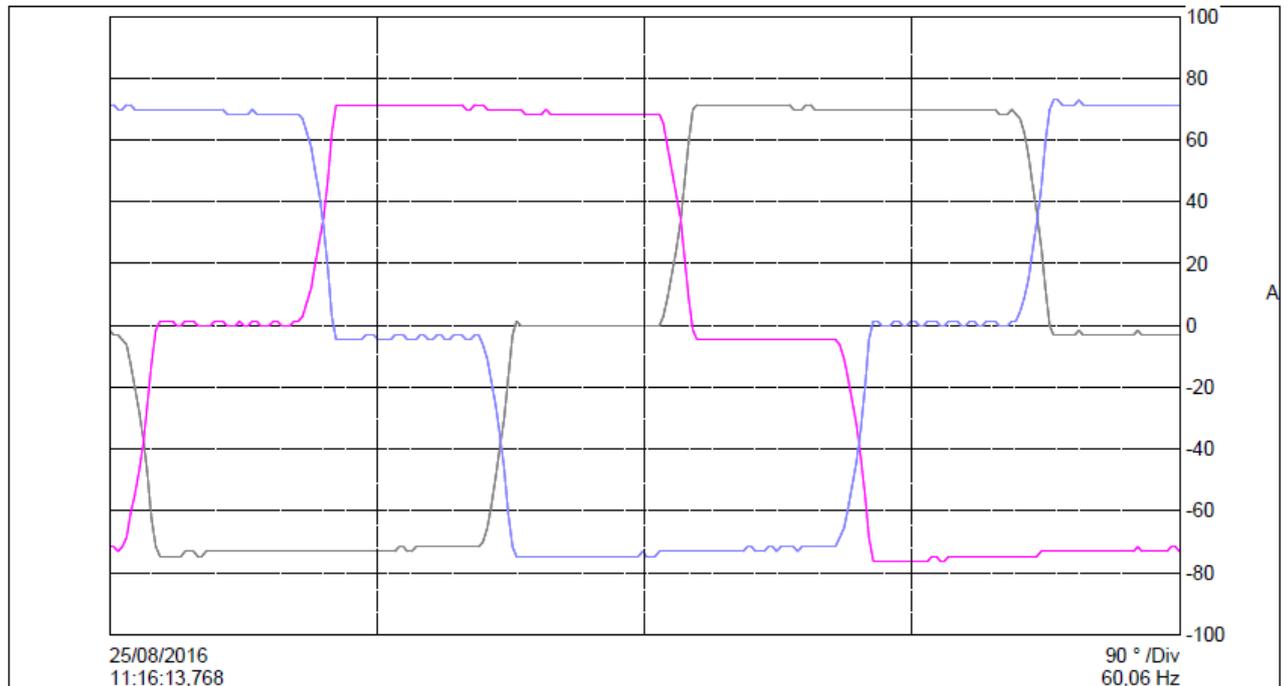
| | | | | | |
|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| U1 RMS = | 165,9 V | Peak- = | -229,0 V | Peak+ = | 229,3 V |
| U2 RMS = | 165,9 V | Peak- = | -229,5 V | Peak+ = | 228,7 V |
| U3 RMS = | 165,8 V | Peak- = | -228,1 V | Peak+ = | 228,5 V |



Pela Figura 59, é possível visualizar a baixa ondulação de corrente devido à predominância indutiva da carga (onda quase quadrada) e também a rampa de transição entre as fases, sendo essa última responsável pelo efeito de *overlap* na tensão.

Figura 59 – Corrente RMS Instantânea - CA-CC não controlado

| | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| A1 RMS = 57,66 A | Peak- = -74,60 A | Peak+ = 71,50 A |
| A2 RMS = 58,01 A | Peak- = -76,10 A | Peak+ = 71,50 A |
| A3 RMS = 57,94 A | Peak- = -74,60 A | Peak+ = 73,10 A |



Devido à não utilização do neutro no circuito, pode se verificar a ausência de harmônicos de terceira ordem (ARRILLAGA, 2003)(PAICE, 1996). Contudo, os harmônicos de 5ª e 7ª ordem são bem evidentes, fato este que pode ser comprovado nas análises de DHT de tensão e corrente nas Figuras 60 e 61.

Figura 60 – DHI de Tensão Instantânea - CA-CC não controlado

| | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| U1 RMS = 165,9 V | Peak- = -229,0 V | Peak+ = 229,3 V |
| U2 RMS = 165,9 V | Peak- = -229,5 V | Peak+ = 228,7 V |
| U3 RMS = 165,8 V | Peak- = -228,1 V | Peak+ = 228,5 V |

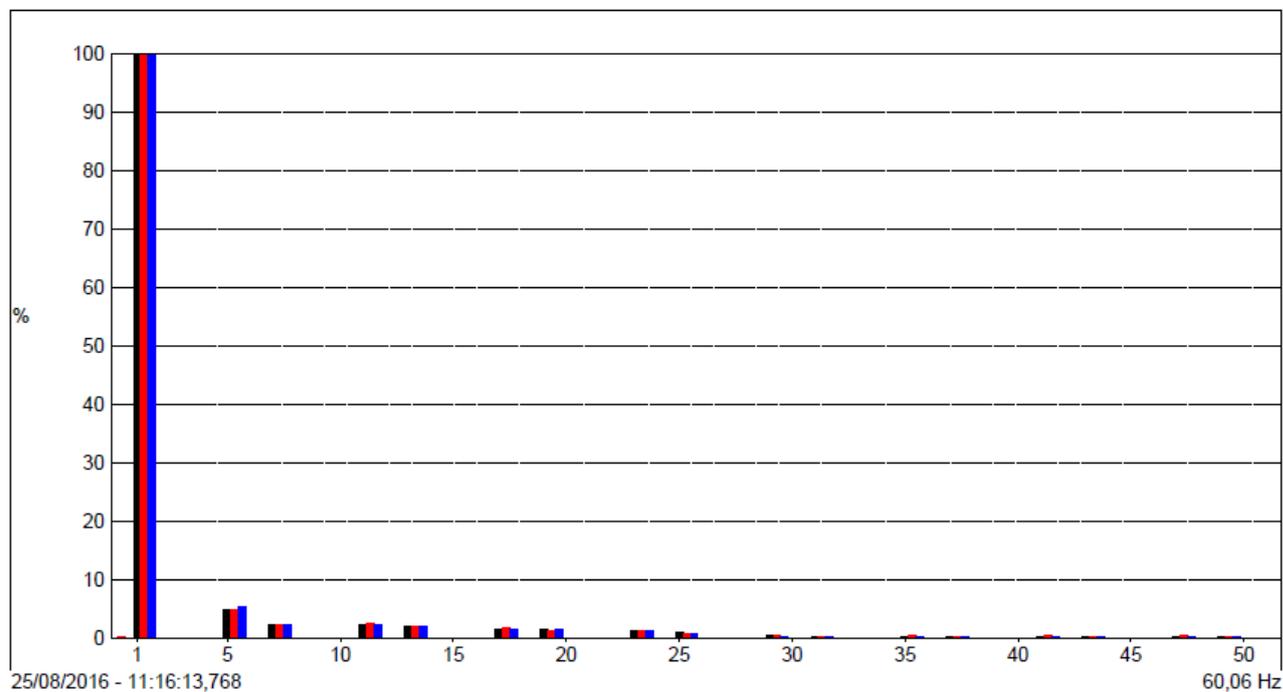
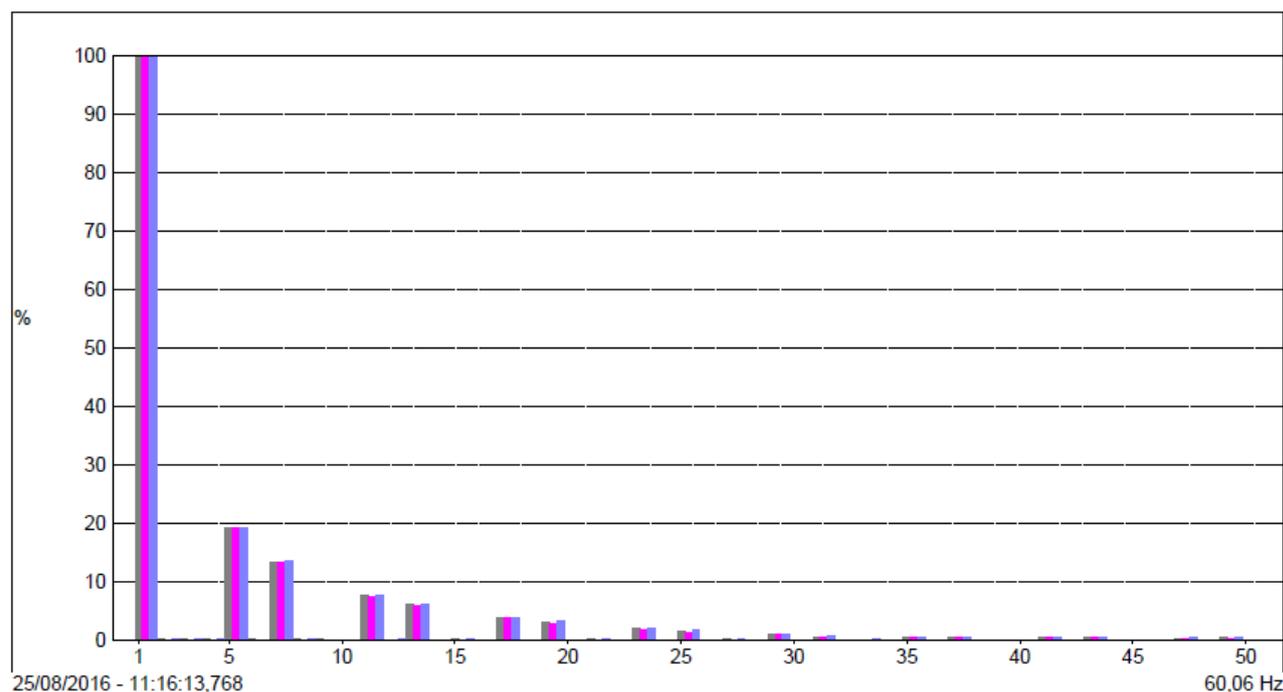


Figura 61 – DHI de Corrente Instantânea - CA-CC não controlado

| | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| A1 RMS = 57,66 A | Peak- = -74,60 A | Peak+ = 71,50 A |
| A2 RMS = 58,01 A | Peak- = -76,10 A | Peak+ = 71,50 A |
| A3 RMS = 57,94 A | Peak- = -74,60 A | Peak+ = 73,10 A |



Foi feito o monitoramento por um período de dez minutos para verificar se o equipamento atendia os limites vigentes no PRODIST (DHT < 10% para tensão < 1kV). A Figura 62 apresenta o resultado para a corrente e a Figura 63 para a tensão.

Figura 62 – DHT de Corrente Gravada - CA-CC não controlado

| | | | |
|----|---------------|-----------|---------------|
| A1 | AVG = 25,25 % | MIN = 0 % | MAX = 26,90 % |
| A2 | AVG = 25,11 % | MIN = 0 % | MAX = 26,80 % |
| A3 | AVG = 25,30 % | MIN = 0 % | MAX = 27,30 % |

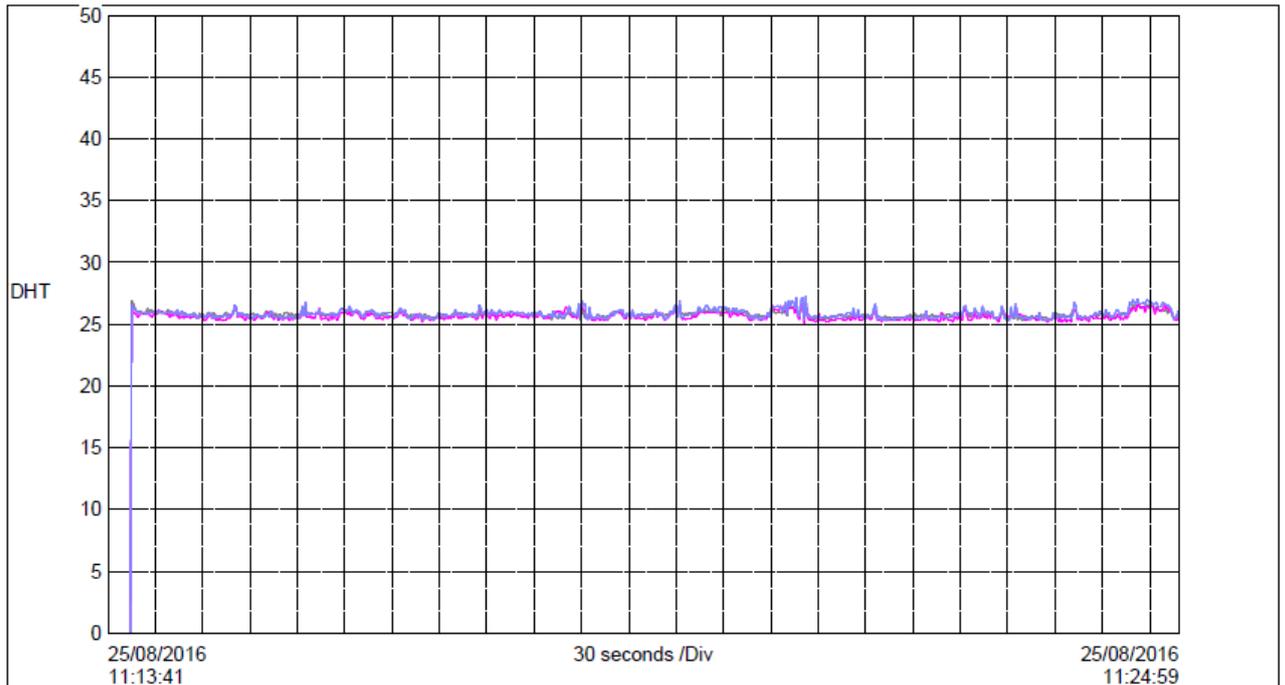
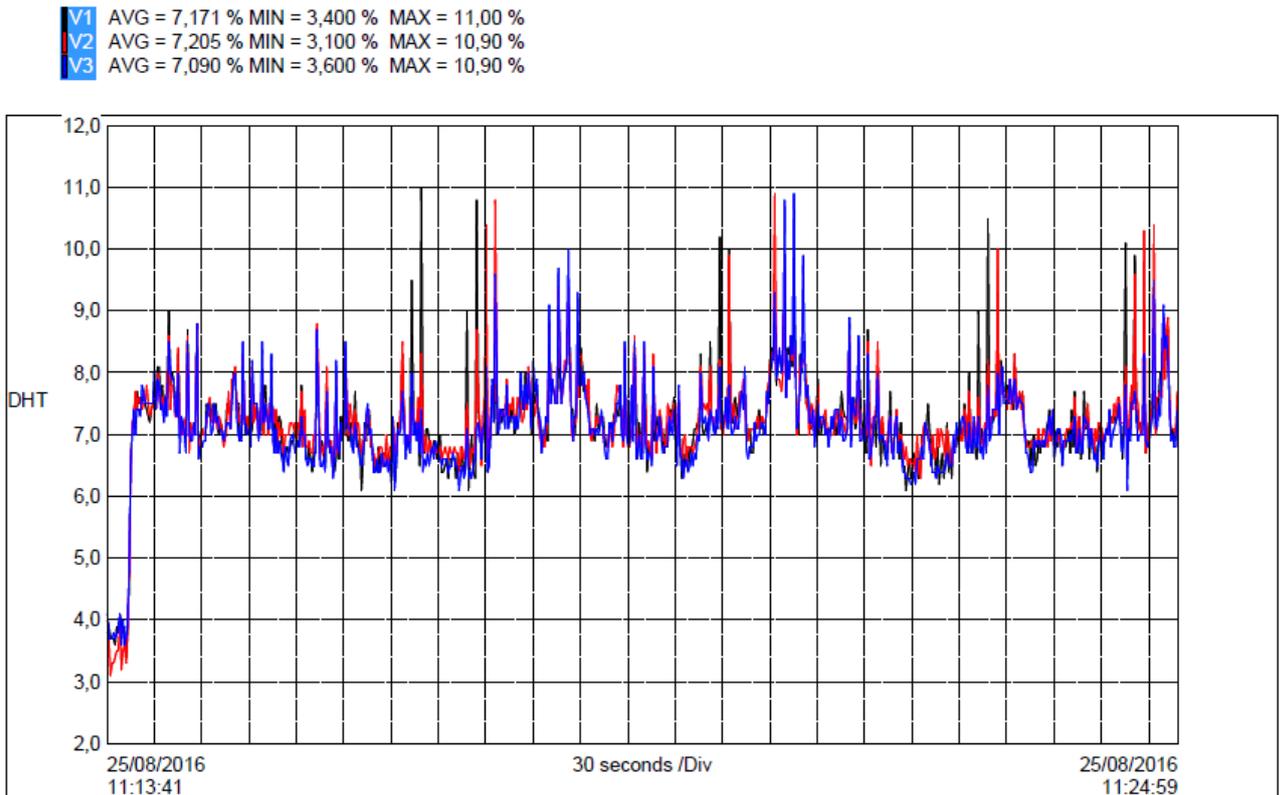


Figura 63 – DHT de Tensão Gravada - CA-CC não controlado



Pode se verificar que a DHT de tensão média é de 7,2%, o que está dentro dos limites permitidos. Ocorrem picos de distorção que são provenientes da, já mencionada, tesoura C41.

Um fato que prova que os picos de distorção não são provocados pelo conversor Varixx é que a DHT da corrente é estável em torno de 25% enquanto a DHT de tensão varia, provando ser de uma outra fonte também conectada ao mesmo barramento.

5.3.1.2 CA-CC Controlado

O conversor CA-CC controlado analisado foi o TYRAK da ABB.

Figura 64 – Conversor CA-CC Tyrak



O esquema interno desse conversor é idêntico ao da Figura 5. Essa topologia é nomeada como retificador controlado em ponte (AHMED, 1999).

A carga acionada é um motor de corrente contínua de 280kW e 440V.

Figura 65 – Motor de Corrente Contínua



O motor é responsável pela movimentação do mecanismo de uma tesoura de corte de material laminado quente.

5.3.1.2.1 Regime de Operação

O funcionamento do motor da tesoura de corte ocorre em quatro etapas:

- i. Acionamento;
- ii. Frenagem;
- iii. Reversão;
- iv. Frenagem.

Essas etapas ocorrem periodicamente, com o tempo de duração de acordo com o comprimento do material a ser cortado.

O conversor é configurado para fornecer um elevado torque de partida para o corte do material na primeira etapa e recolhimento da tesoura na terceira. As etapas de frenagem ocorrem pelo método de contra-corrente, que é realizado pela inversão da fonte de alimentação da armadura do motor.

5.3.1.2.2 Resultados

Os elevados picos de corrente de aproximadamente 1200A e, conseqüentemente, quedas de tensão devido à demanda elevada de corrente do transformador que alimenta todo o barramento podem ser vistos no monitoramento realizado por um período de seis minutos nas Figuras 66 e 67.

Figura 66 – Corrente RMS Gravada - CA-CC controlado

A1 RMS AVG = 40,07 A MIN = 0 A MAX = 1144 A
A2 RMS AVG = 35,54 A MIN = 0 A MAX = 1018 A
A3 RMS AVG = 40,81 A MIN = 0 A MAX = 1171 A

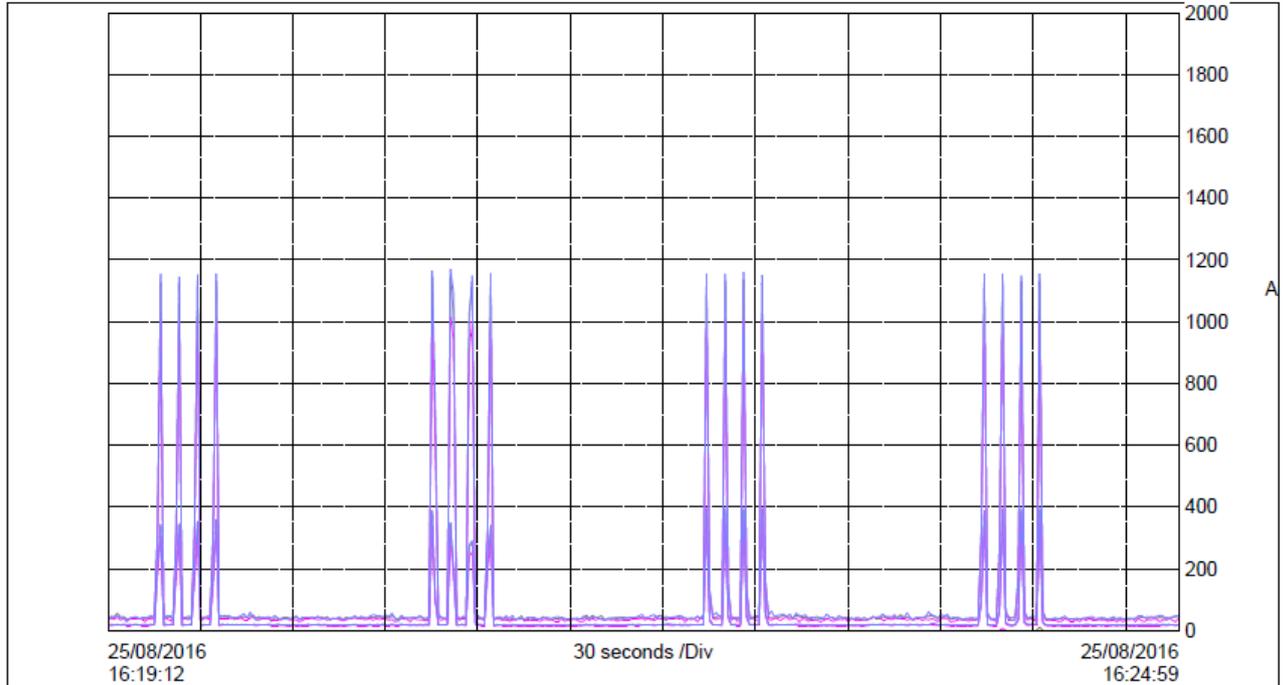
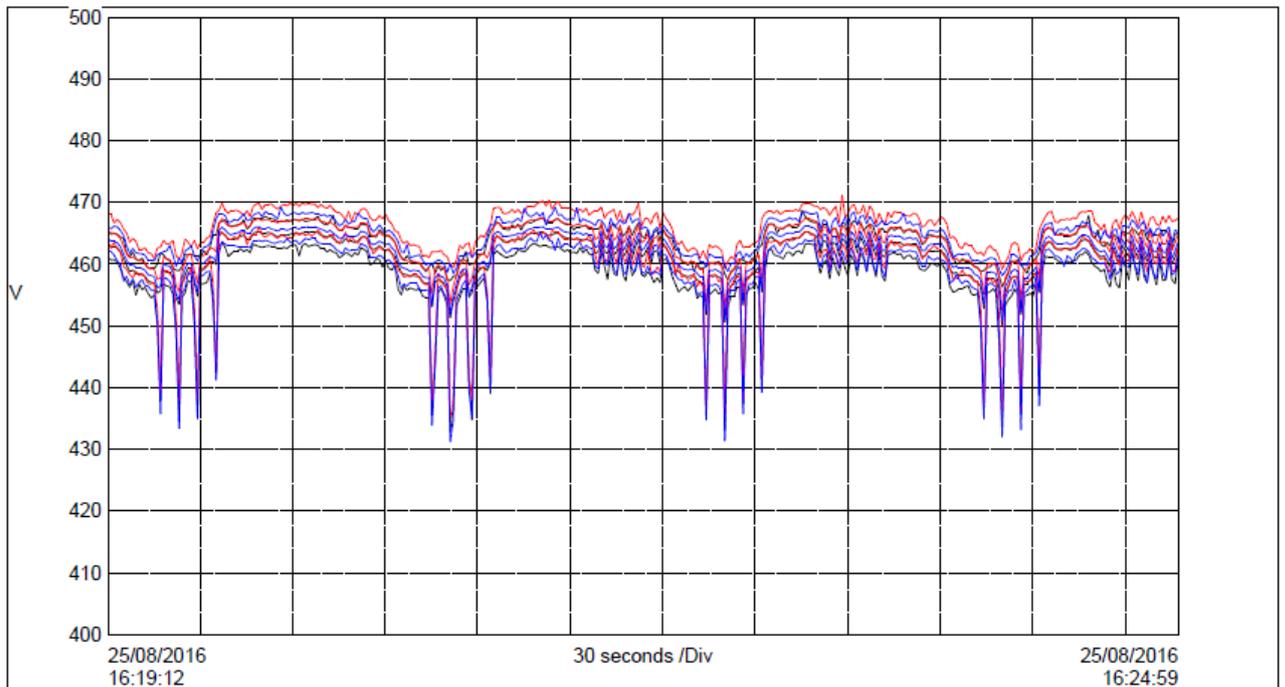


Figura 67 – Tensão RMS Gravada - CA-CC controlado

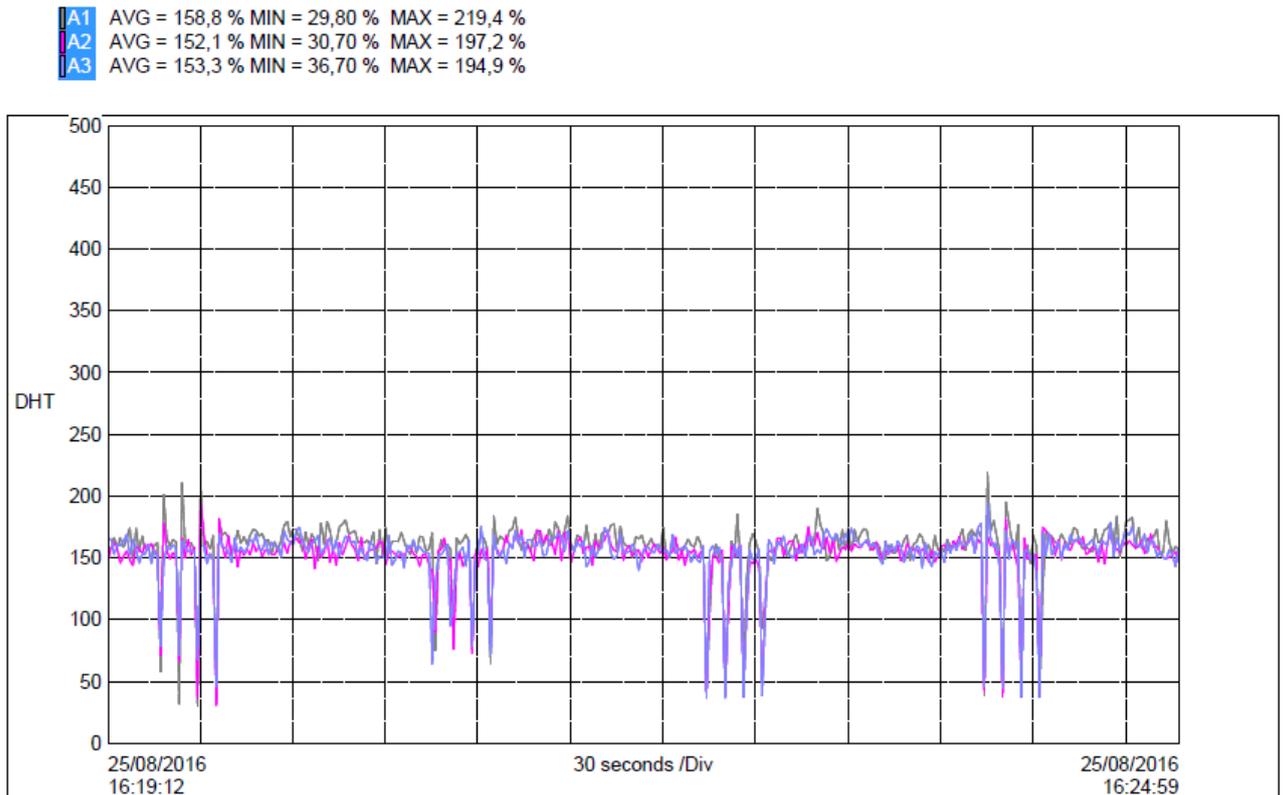
U1 RMS AVG = 461,3 V MIN = 432,8 V MAX = 468,8 V
U2 RMS AVG = 463,5 V MIN = 435,1 V MAX = 471,2 V
U3 RMS AVG = 462,2 V MIN = 431,3 V MAX = 469,3 V



Valores instantâneos de medição não foram registrados, pois o acionamento é muito rápido, não sendo possível capturar o registro do momento de operação em plena carga.

O valor de DHT de corrente no maior período de medição está em torno de 150% como se pode ver na Figura 68. Valor este que não deve ser levado em consideração, pois a referência do mesmo nesse instante é de apenas 20A, o que está muito longe do valor nominal de 703A, não provocando nenhum efeito na tensão do sistema.

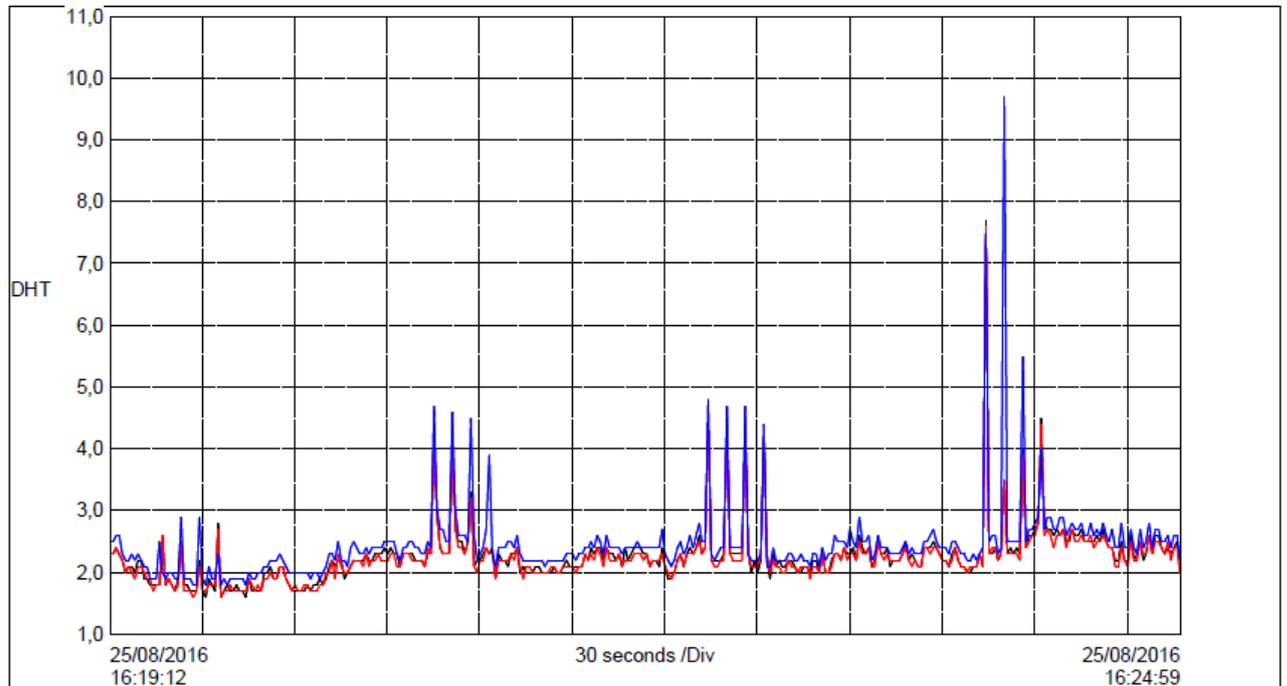
Figura 68 – DHT de Corrente Gravada - CA-CC controlado



Em contrapartida, no momento do corte, a corrente de alimentação do conversor chega a 1200A, obtendo valores de DHT de corrente de aproximadamente 50% e, conseqüentemente, distorções momentâneas de tensão de 5% conforme Figura 69. O valor de DHT de tensão está de acordo com a recomendação do PRODIST (DHT < 10% para tensão < 1kV). Porém, em alguns ciclos, este valor se eleva a bem próximo do limite de 10%, o que provoca perturbações nas demais cargas conectadas ao secundário do mesmo transformador.

Figura 69 – DHT de Tensão Gravada - CA-CC controlado

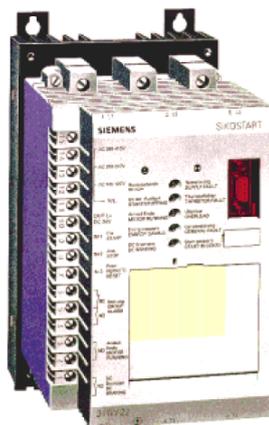
U1 AVG = 2,270 % MIN = 1,600 % MAX = 7,700 %
U2 AVG = 2,241 % MIN = 1,600 % MAX = 7,600 %
U3 AVG = 2,453 % MIN = 1,800 % MAX = 9,700 %



5.3.2 CA-CA

O conversor CA-CA analisado é o *soft starter* Sikostart da SIEMENS.

Figura 70 – Conversor CA-CA Sikostart



(SIEMENS, 1999)

O conversor Sikostart possui comando microprocessado o qual controla o ângulo de disparo dos tiristores ajustando a tensão para a carga. Esse dispositivo controla o valor da tensão até a tensão nominal, ou seja, não varia nenhuma outra grandeza senão a tensão.

Diferentemente dos conversores CC-CA a frequência permanece constante e igual à da rede (SIEMENS, 1999).

Após a finalização da partida, os tiristores trabalham transferindo totalmente a tensão da rede para o motor.

A carga acionada é um motor de indução trifásico de 250CV conectado à uma bomba.

Figura 71 – Motor de Indução 250CV



5.3.2.1 Regime de Operação

A tensão de partida do motor foi configurada para 20% do valor da tensão nominal com uma rampa de aceleração com duração de 180 segundos. Essa configuração foi utilizada para melhor representação dos efeitos harmônicos durante a etapa de aceleração.

5.3.2.2 Resultados

Analisando os resultados para a corrente, pode se identificar o pico no momento de partida do motor até a velocidade nominal na Figura 72. Nesse momento, os tiristores realizam o chaveamento para possibilitar a partida suave da máquina. Após o tempo decorrido de partida, o conversor realiza a comutação interna, fazendo o *by pass* dos tiristores e alimentando a carga diretamente pela rede.

O pico de corrente causado na partida traz como consequência a queda de tensão no barramento de alimentação, assim como apresentado na Figura 73.

Figura 72 – Corrente RMS Gravada - CA-CA

A1 RMSAVG = 269,8 AMIN = 0 AMAX = 684,0 A
A2 RMSAVG = 265,5 AMIN = 0 AMAX = 679,0 A
A3 RMSAVG = 256,4 AMIN = 0 AMAX = 650,0 A

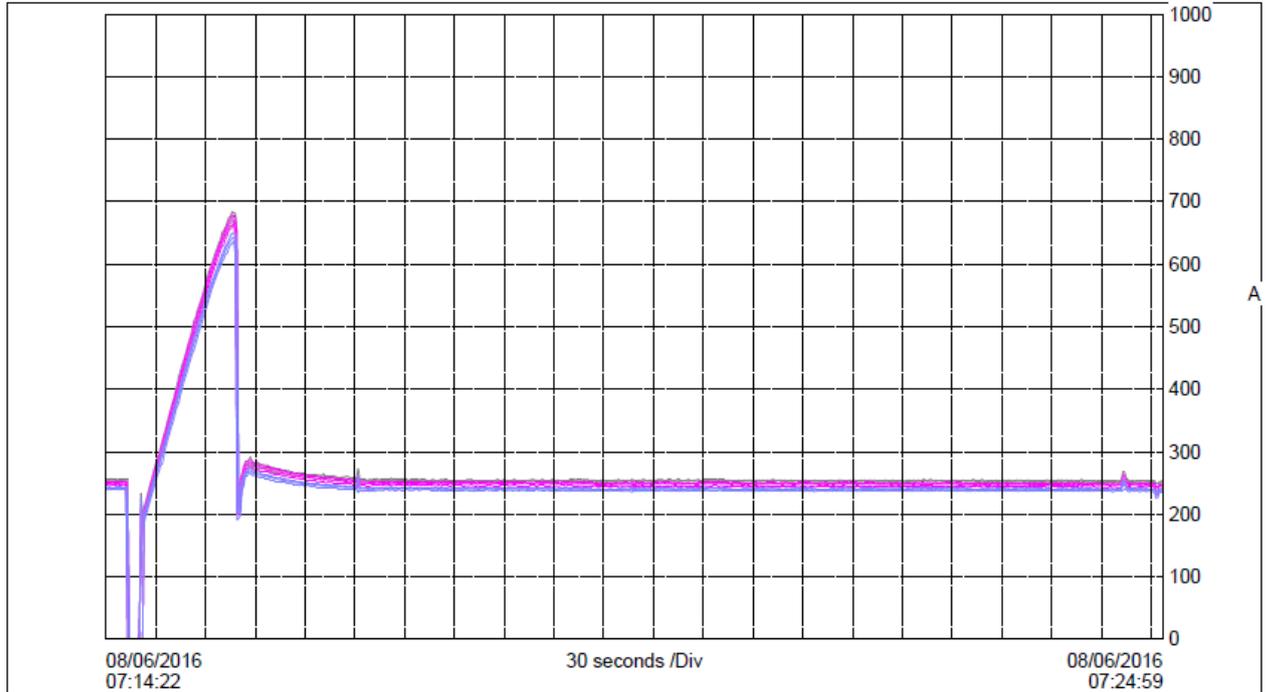
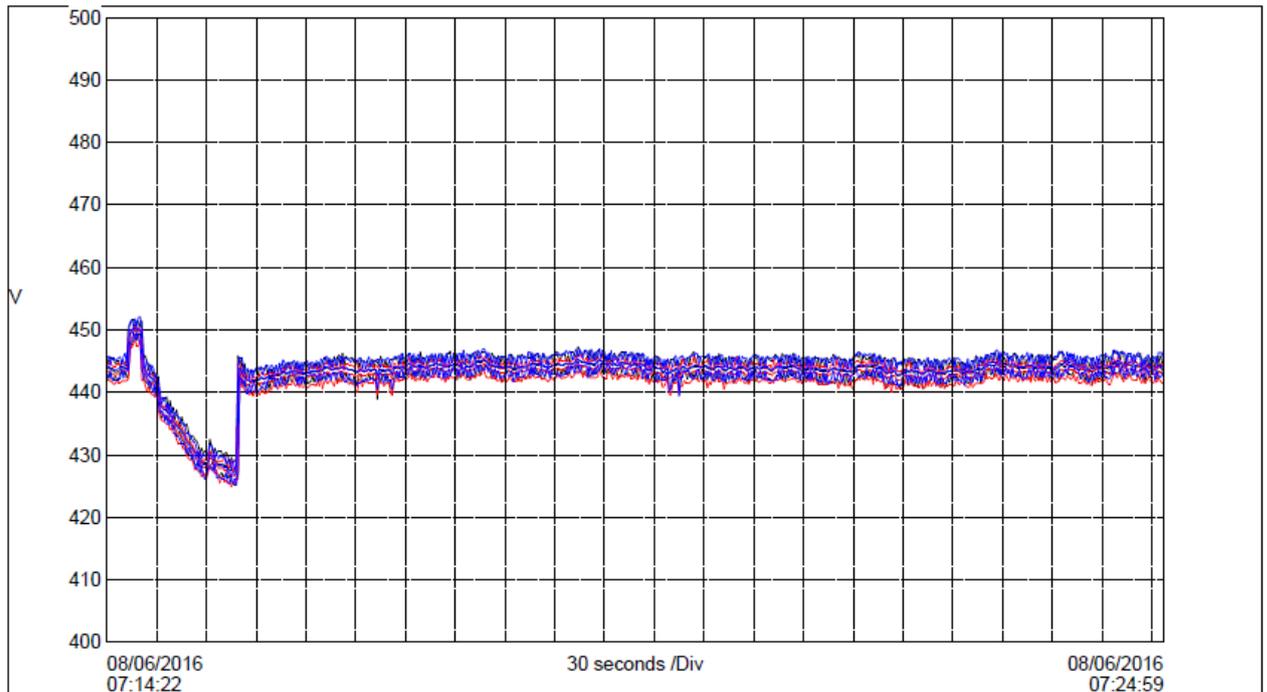


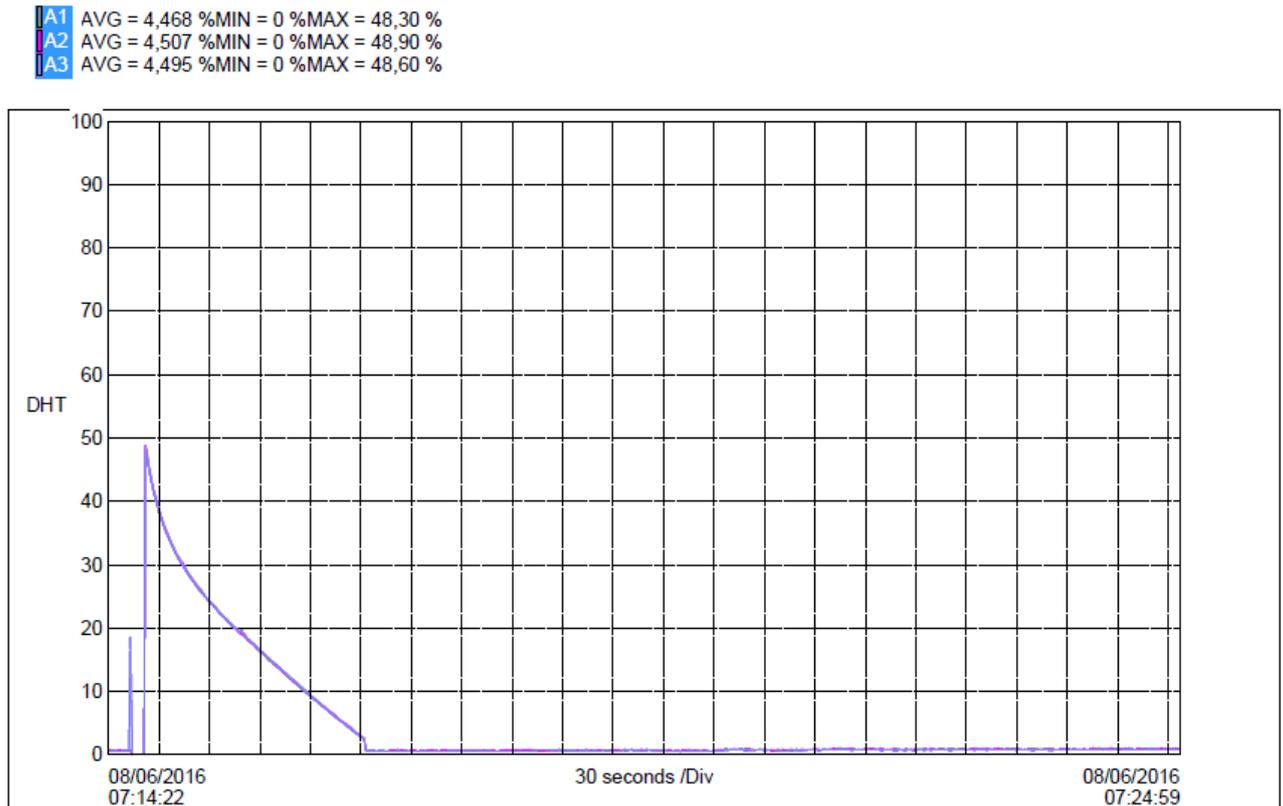
Figura 73 – Tensão RMS Gravada - CA-CA

U1 RMSAVG = 442,9 VMIN = 425,1 VMAX = 451,6 V
U2 RMSAVG = 442,2 VMIN = 424,9 VMAX = 450,6 V
U3 RMSAVG = 443,1 VMIN = 425,1 VMAX = 452,1 V



A taxa de distorção harmônica gerada pelo chaveamento dos tiristores pode ser identificada no monitoramento mostrado na Figura 74. Logo após a realização do *by pass*, a DHT produzida pelo conversor praticamente se anula, restando apenas os harmônicos gerados pela própria máquina.

Figura 74 – DHT de Corrente Gravada - CA-CA

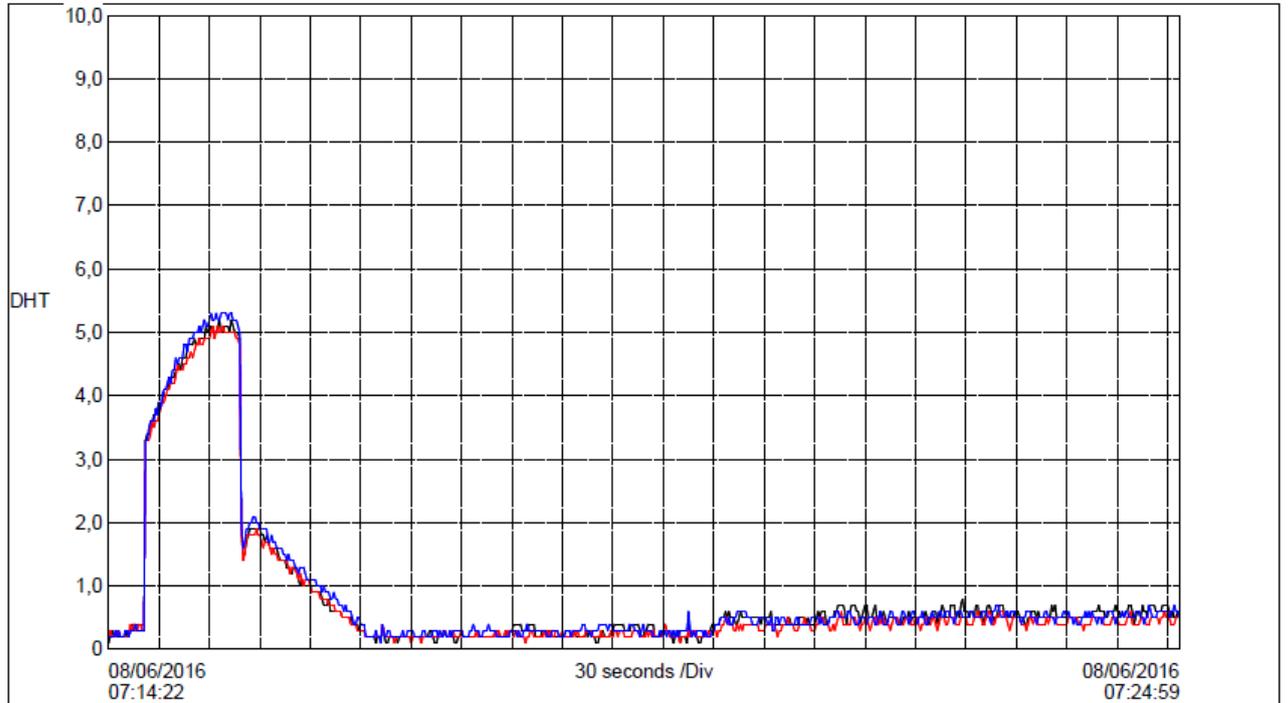


A taxa de distorção da corrente impacta na tensão do sistema conforme pode ser visto na Figura 75. Observa-se que o comportamento da DHT de tensão é o mesmo da corrente, ou seja, a distorção somente foi provocada na partida.

Verifica-se que o valor máximo atingido foi de pouco mais de 5%, sendo assim, não ultrapassa os limites definidos pela recomendação do PRODIST, que é 10%.

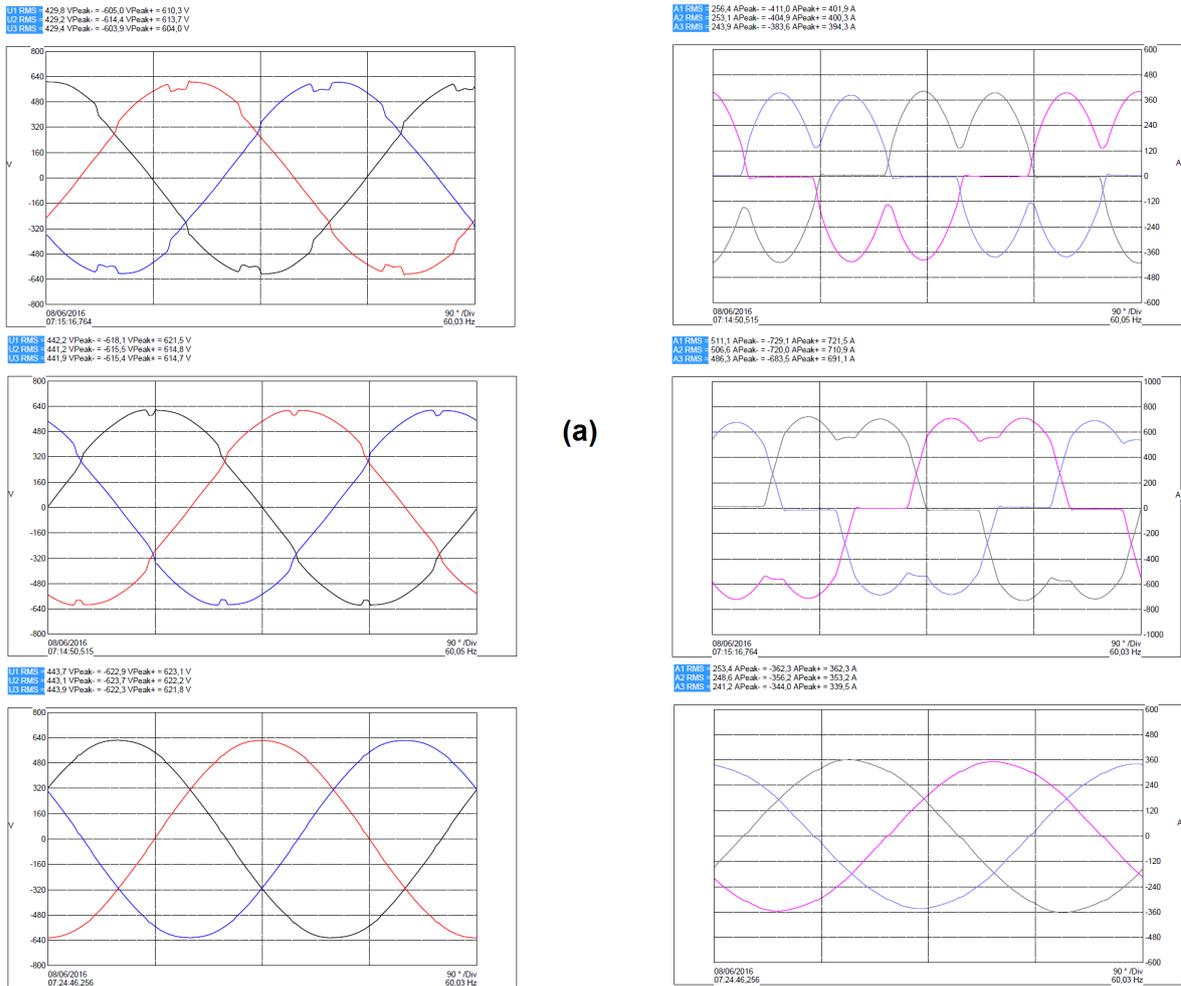
Figura 75 – DHT de Tensão Gravada - CA-CA

U1 AVG = 0,8591 %MIN = 0,1000 %MAX = 5,200 %
U2 AVG = 0,7964 %MIN = 0,1000 %MAX = 5,100 %
U3 AVG = 0,8795 %MIN = 0,1000 %MAX = 5,300 %



Assim como apresentado na Figura 76, foram coletados três instantes da partida da máquina, sendo o intuito observar as mudanças nas formas de onda de corrente e tensão provenientes da variação do ângulo de disparo dos tiristores.

Figura 76 – Tensão(a) e Corrente(b) RMS de Partida para Três Instantes



Como pode se observar, a geração de harmônicos em um conversor CA-CA se dá de forma predominante na partida. Sendo assim, deve-se ter atenção caso existam capacitores para correção do fator de potência presentes na linha, devendo os mesmos serem inseridos após a partida da máquina e retirados antes da realização da rampa de parada da mesma. Esse procedimento evita que as frequências harmônicas geradas durante o chaveamento possam entrar em ressonância com os capacitores e causar efeitos indesejados ao sistema.

Se possível, a partida das máquinas deve ser sequencial, quando se tratar de várias no mesmo barramento. Isso faz com que as distorções harmônicas sejam menores, já que após a máquina estar em regime permanente essa distorção é quase nula.

5.3.3 CC-CA

Foram analisados dois conversores CC-CA, sendo o primeiro de apenas um nível e o segundo multinível.

5.3.3.1 Conversor CC-CA de um Nível

O conversor CC-CA de um nível analisado foi o Micromaster 430 da SIEMENS.

Figura 77 – Conversor CC-CA Micromaster 430

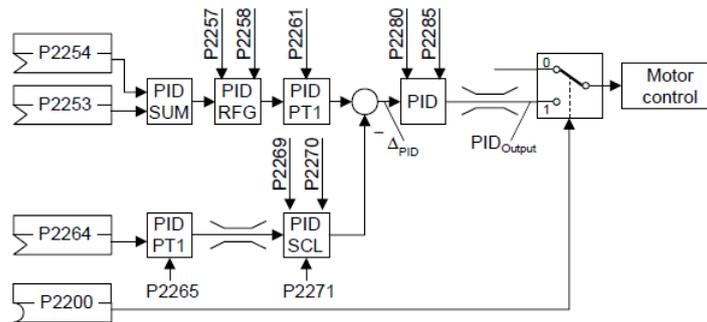


(SIEMENS, 2005)

Este equipamento oferece a possibilidade de controle da carga via controlador PID. O *setpoint* do processo pode ser fixo ou analógico. O valor em tempo real do processo é dado por um sensor conectado ao conversor via entrada analógica. A estrutura do controlador implementado é apresentado na Figura 78.

Figura 78 – Estrutura do controlador PID - Micromaster 430

Estrutura do regulador PID



Exemplo

| Parâmetro | Texto do parâmetro | Exemplo |
|-----------|---------------------------------|-------------------------------------|
| P2200 | BI: Habilita o regulador PID | P2200 = 1.0 Regulador PID ativo |
| P2253 | CI: Setpoint do PID | P2253 = 2224 PID-FF1 |
| P2264 | CI: Feedback do PID | P2264 = 755 ADC |
| P2267 | Feedback max. do PID | P2267 Adaptar à aplicação |
| P2268 | Feedback min. do PID | P2268 Adaptar à aplicação |
| P2280 | Ganho proporcional do PID | P2280 Determinado por otimização |
| P2285 | Tempo integral do PID | P2285 Determinado por otimização |
| P2291 | Limite superior de saída do PID | P2291 Adaptar à aplicação |
| P2292 | Limite inferior de saída do PID | P2292 Adaptar à aplicação |

(SIEMENS, 2005)

A carga acionada por esse conversor possui as mesmas características da acionada pelo conversor CA-CA.

5.3.3.1.1 Regime de Operação

O controlador PID implementado nesse conversor age de modo a reduzir a tensão aplicada ao motor, reduzindo o consumo, na ausência de carga. Visto que o motor age no acionamento de uma bomba hidráulica, o nível do tanque de água é que define o controle da modulação PWM no estator do motor.

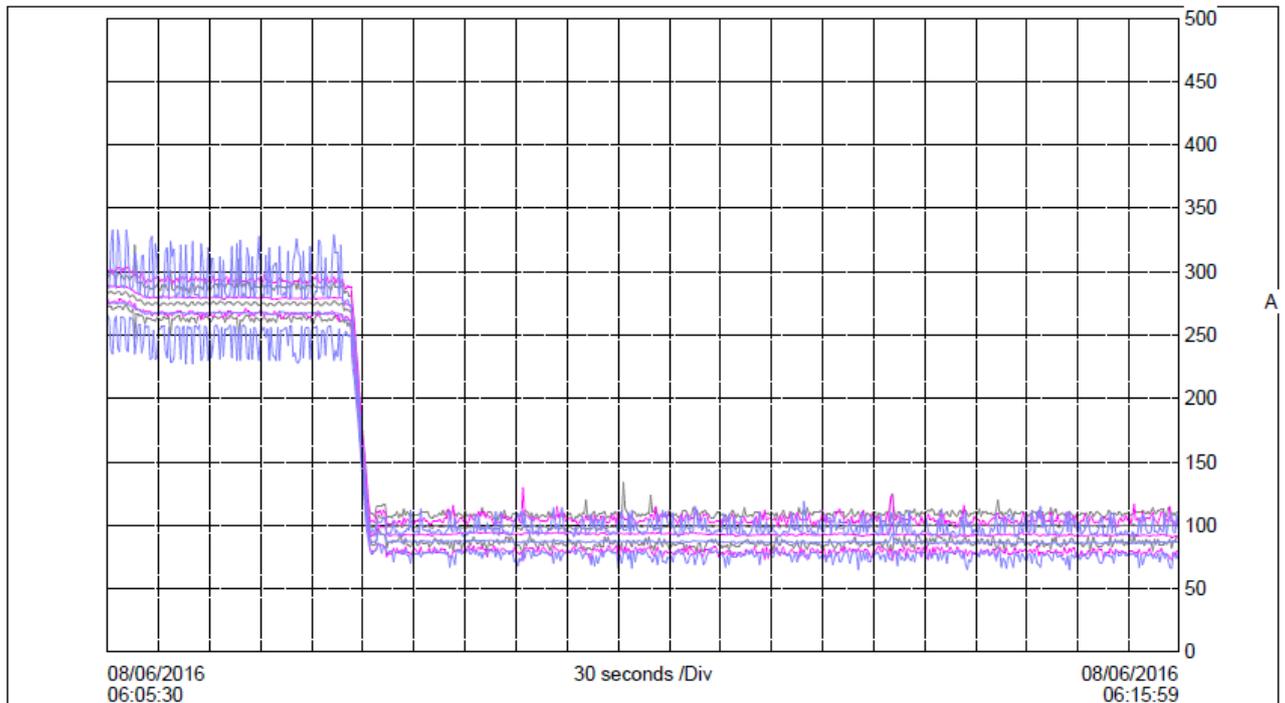
5.3.3.1.2 Resultados

Foi realizada a medição no conversor CC-CA em duas etapas, sendo a primeira delas medindo na entrada do conversor e a segunda medindo antes da conexão com o reator.

A Figura 79 apresenta o comportamento da corrente RMS de alimentação do conversor. Observa-se que o conversor está parametrizado para receber a referência de velocidade através de um controlador PID, desta forma o mesmo foi acionado com a referência de velocidade nominal no início do monitoramento atingindo aproximadamente 290A, que é a corrente nominal. Após aproximadamente 2,5 minutos a referência de velocidade do conversor foi reduzida, passando a consumir uma corrente de aproximadamente 100A.

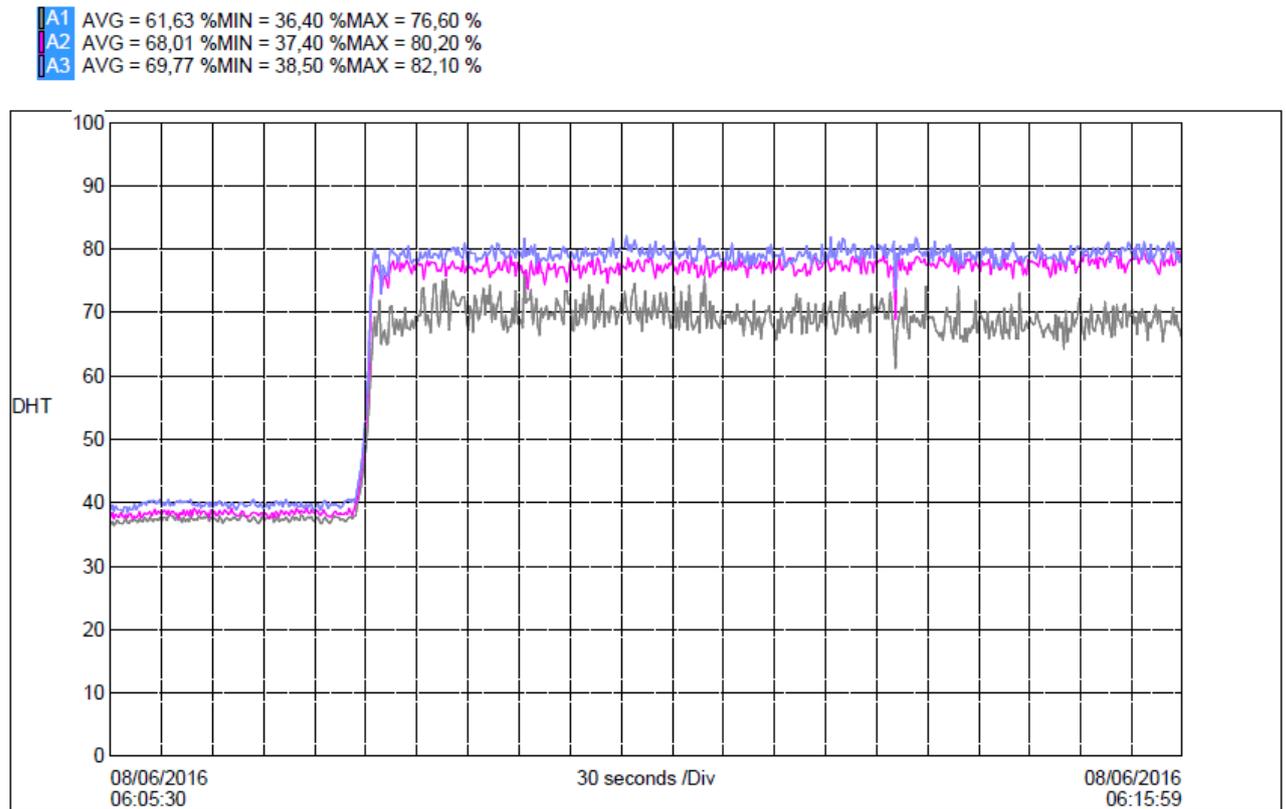
Figura 79 – Corrente RMS Gravada - CC-CA de um Nível

A1 RMSAVG = 141,0 AMIN = 77,00 AMAX = 321,0 A
A2 RMSAVG = 137,2 AMIN = 72,00 AMAX = 304,0 A
A3 RMSAVG = 129,7 AMIN = 65,00 AMAX = 333,0 A



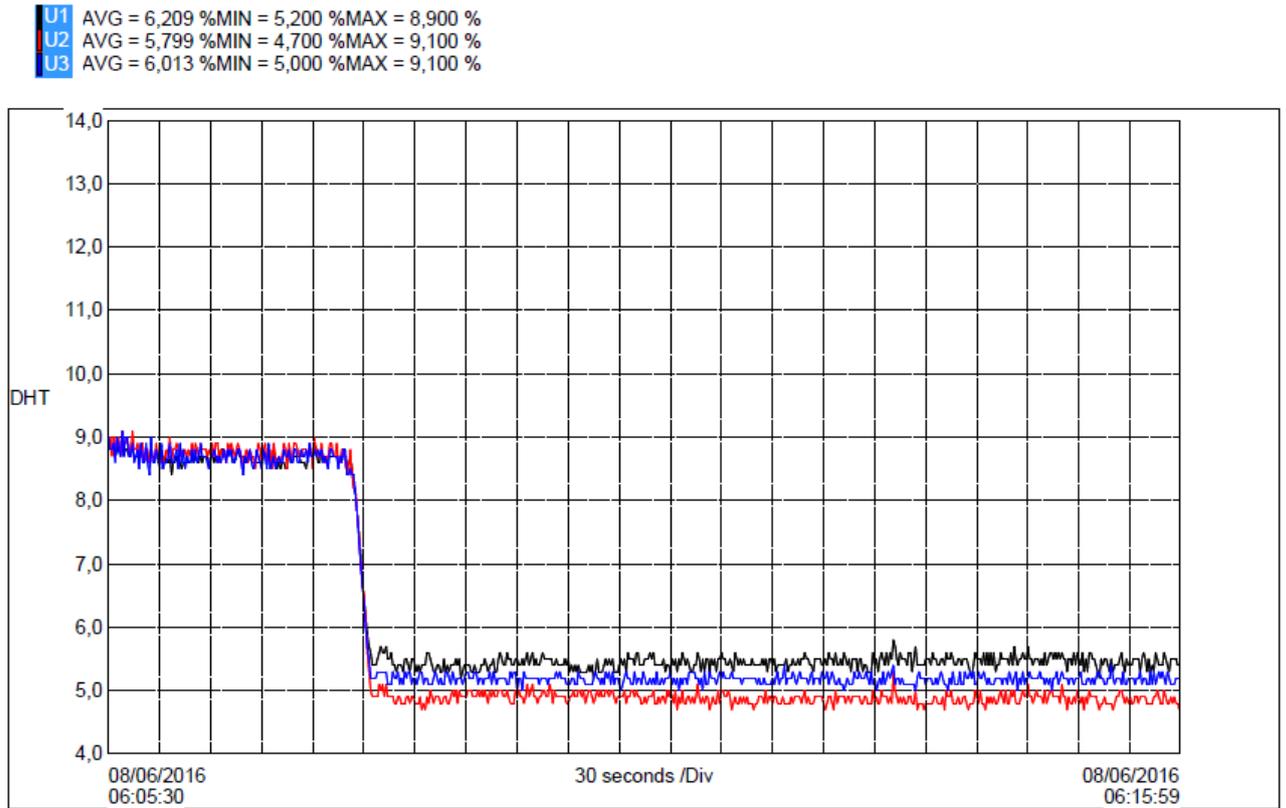
O comportamento do regime de trabalho influencia na DHT da corrente conforme pode ser visto na Figura 80, porém, como a mesma é calculada com base na corrente fundamental, o seu percentual relativo é alto. O valor absoluto da corrente em si é baixo, não impactando tanto no sistema.

Figura 80 – DHT de Corrente Gravada - CC-CA de um Nível



O impacto da corrente no sistema pode ser visto no monitoramento da distorção de tensão do barramento na Figura 81. Pode se observar que apesar da DHT de corrente estar mais alta devido à redução da velocidade na sexta divisão do gráfico, o seu efeito na DHT de tensão foi mais baixo, o que ocorre pela corrente distorcida ser de menor amplitude.

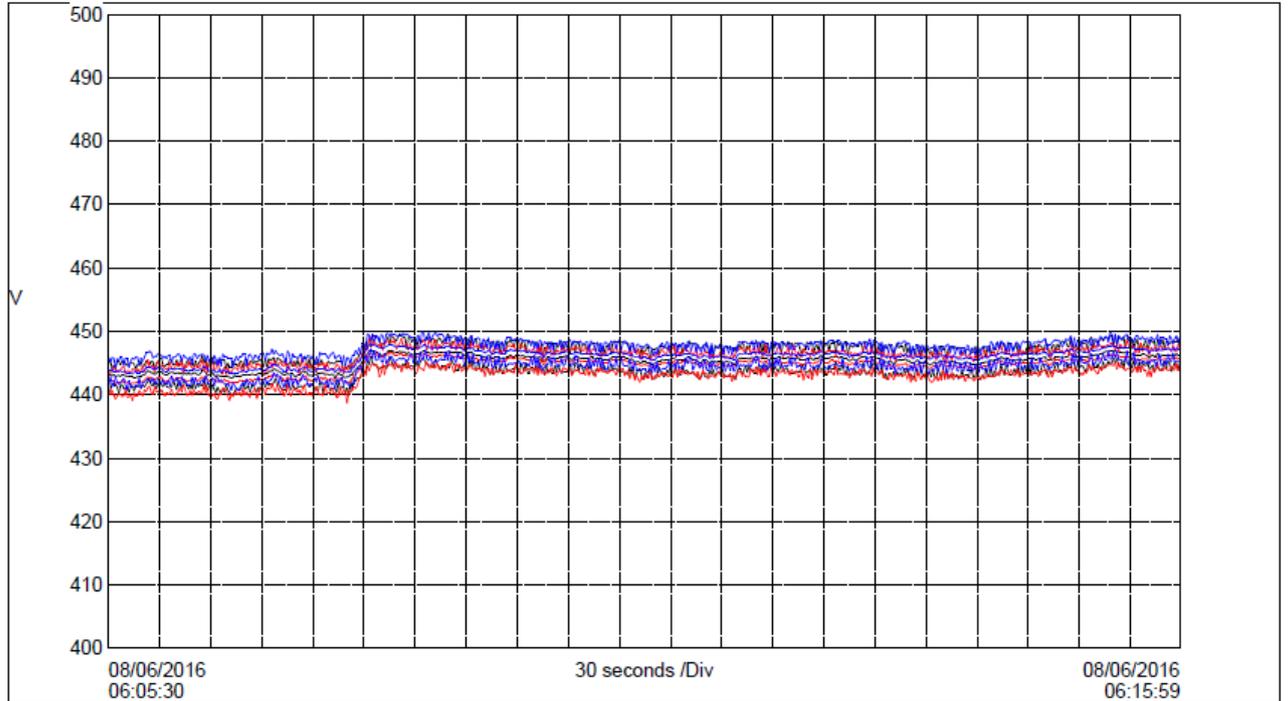
Figura 81 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA de um Nível



Conforme a Figura 82, o valor RMS da tensão se alterou pouco durante a variação do regime de trabalho, pois o transformador que alimenta todo o barramento tem uma demanda baixa com relação à carga instalada.

Figura 82 – Tensão RMS Gravada - CC-CA de um Nível

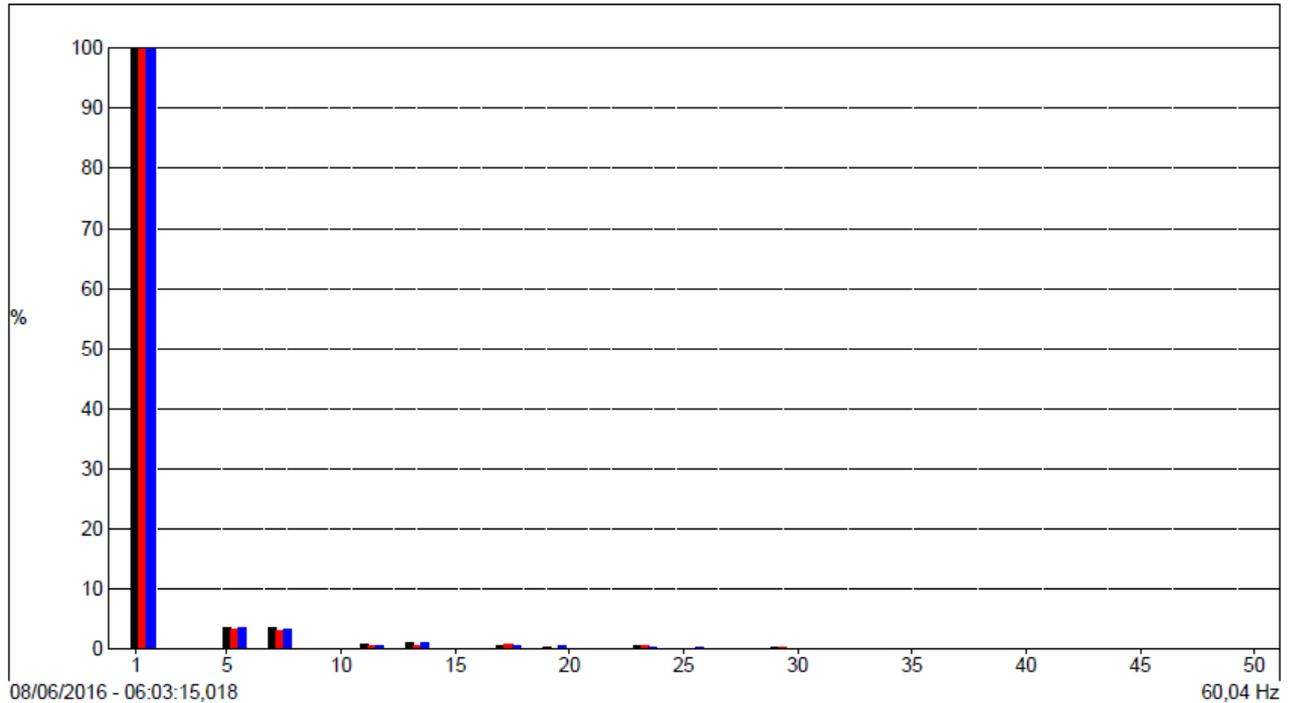
U1 RMSAVG = 445,2 VMIN = 440,0 VMAX = 449,6 V
U2 RMSAVG = 444,6 VMIN = 438,7 VMAX = 449,1 V
U3 RMSAVG = 446,0 VMIN = 440,7 VMAX = 449,9 V



Analisando a decomposição da distorção harmônica de tensão na Figura 83 nas respectivas ordens no regime de trabalho nominal, verifica-se a ausência dos harmônicos de 3ª ordem e seus múltiplos devido à carga ser trifásica, sendo a DHT aproximadamente 9%, o que ainda está dentro do limite da norma PRODIST, que é 10%.

Figura 83 – DHI de Tensão Instantânea - CC-CA de um Nível

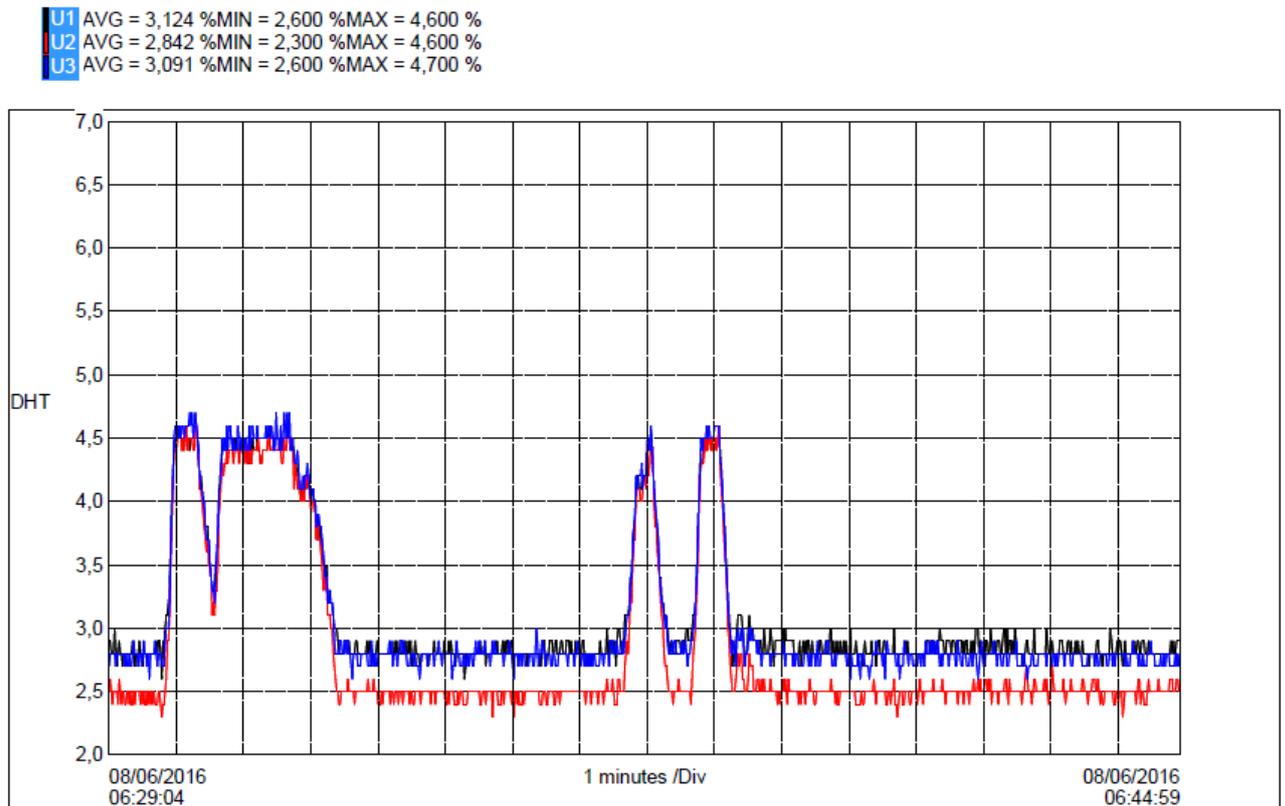
U1 RMS = 445,8 VPeak- = -613,5 VPeak+ = 617,5 V
U2 RMS = 445,2 VPeak- = -620,8 VPeak+ = 619,1 V
U3 RMS = 446,7 VPeak- = -622,0 VPeak+ = 621,8 V



Para reduzir o efeito da distorção harmônica gerada pelos conversores se usa, geralmente, reatores na entrada de alimentação.

A segunda medição, sendo realizada no reator, prova que ocorre uma redução significativa da DHT quando se considera o reator de entrada como é mostrado na Figura 84.

Figura 84 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA de um Nível



Em regime nominal, a taxa de distorção harmônica foi reduzida de aproximadamente 9% para aproximadamente 4,5%. Essa variação pode ser verificada também quando se analisa o perfil da forma de onda da tensão para as duas situações nas Figuras 85 sem reator e na Figura 86 com reator. Verifica-se um perfil mais próximo da senoide pura quando se mede na entrada do reator.

Figura 85 – Tensão RMS Instantânea -sem reator - CC-CA de um Nível

U1 RMS = 442,8 VPeak- = -608,1 VPeak+ = 608,6 V
U2 RMS = 442,3 VPeak- = -613,8 VPeak+ = 613,1 V
U3 RMS = 443,3 VPeak- = -614,1 VPeak+ = 614,7 V

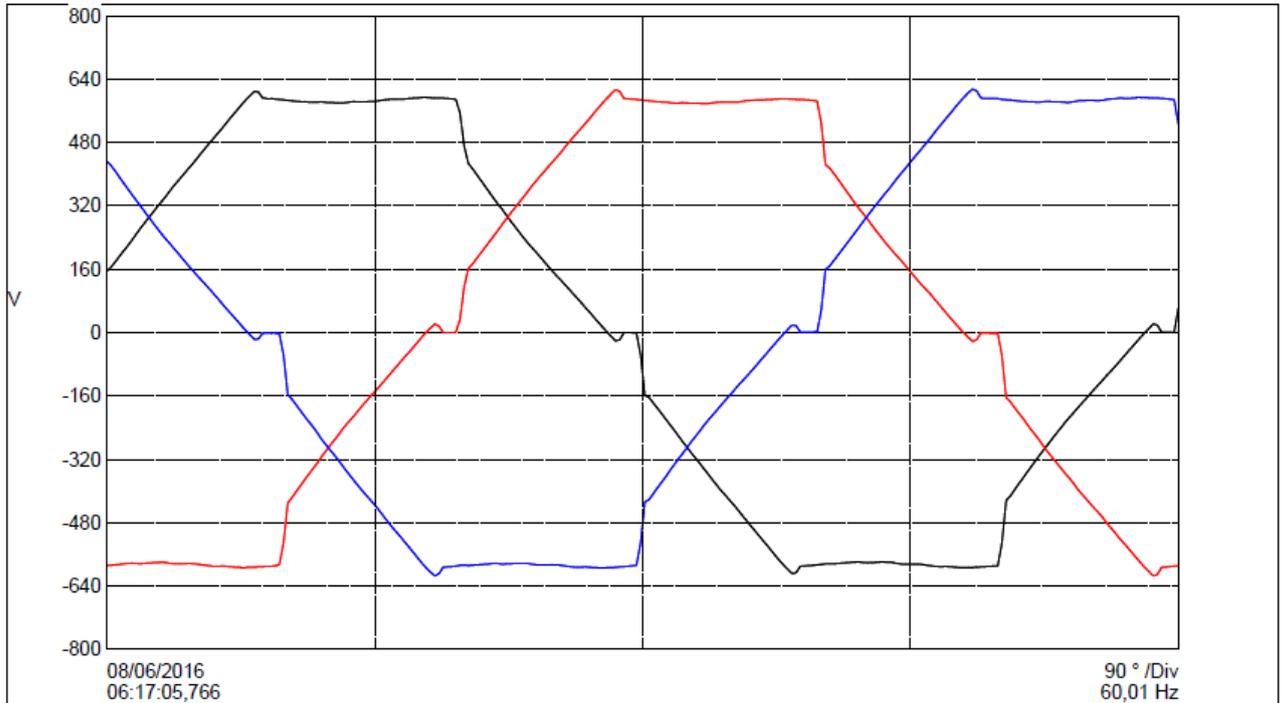
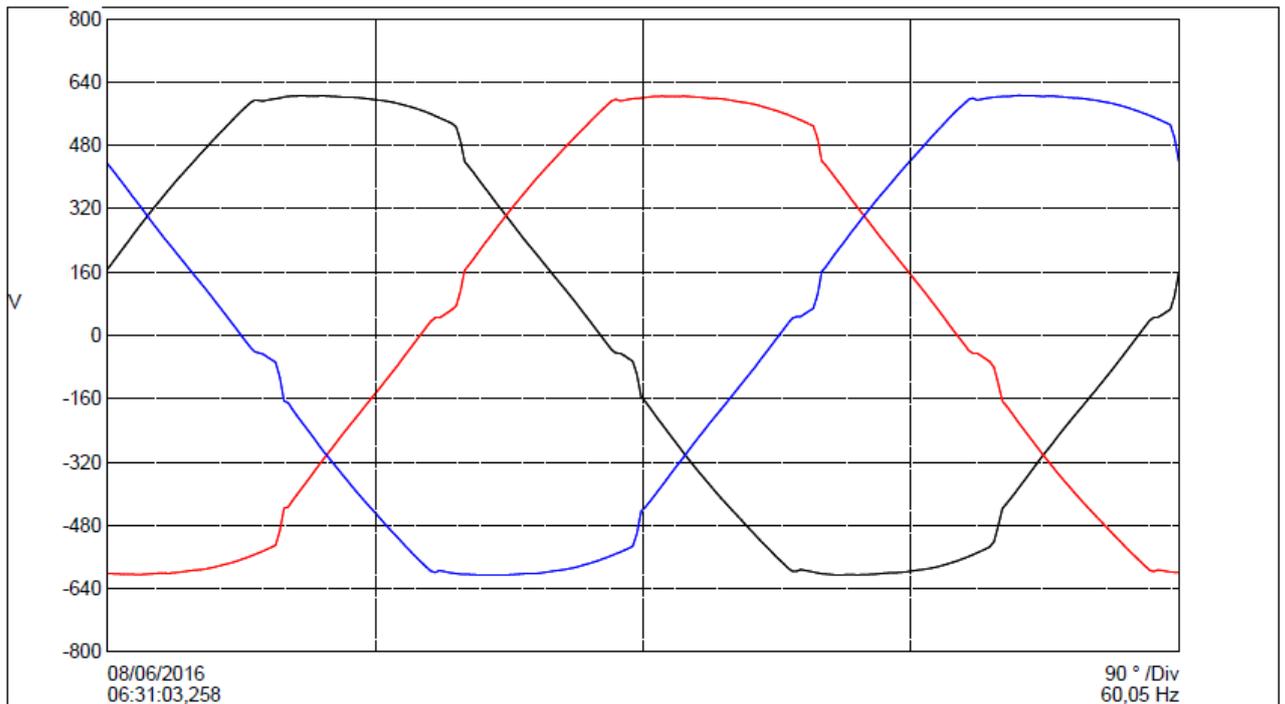


Figura 86 – Tensão RMS Instantânea -com reator - CC-CA de um Nível

U1 RMS = 444,2 VPeak- = -605,0 VPeak+ = 605,3 V
U2 RMS = 443,1 VPeak- = -604,4 VPeak+ = 604,3 V
U3 RMS = 444,6 VPeak- = -605,6 VPeak+ = 606,1 V



5.3.3.2 Conversor CC-CA Multinível

O conversor CC-CA multinível analisado foi o Drive G7 da YASKAWA.

Figura 87 – Conversor CC-CA Drive G7



(YASKAWA, 2007)

Esse equipamento utiliza-se da arquitetura de modulação a 3 níveis.

A carga acionada pelo conversor são 12 motores de 3CV que compõem o trem de rolos que transportam barras laminadas mostrados na Figura 88.

Figura 88 – Motores do Trem de Rolo



5.3.3.2.1 Regime de Operação

As medições se realizaram com a carga em regime permanente com frequência reduzida de 44 Hz. Para se comparar os efeitos da modulação a um e três níveis, foi realizada a medição também em um conversor CC-CA da ABB de um nível acionando o mesmo

tipo de carga. Salienta-se que a medição nesta etapa foi realizada na saída de ambos os conversores, onde foi possível analisar a taxa de distorção harmônica na alimentação dos motores.

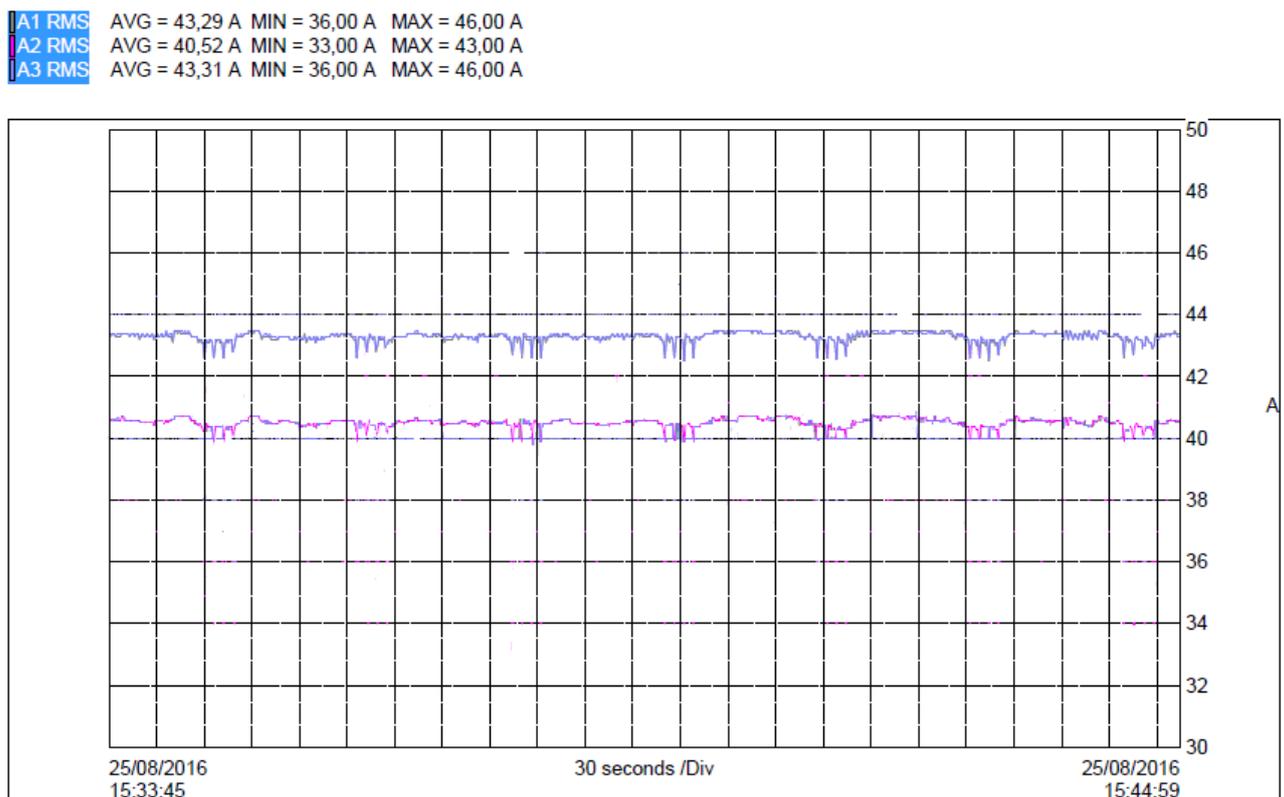
5.3.3.2.2 Resultados

Conforme a Figura 54, foram realizadas as medições na saída para o motor dos dois conversores, sendo no conversor de um nível a medição realizada após o reator de saída.

Nesta etapa, o objetivo é verificar o nível de distorção harmônica da tensão e corrente aplicada ao motor, visto que a distorção na entrada do conversor foi analisada no conversor MICROMASTER.

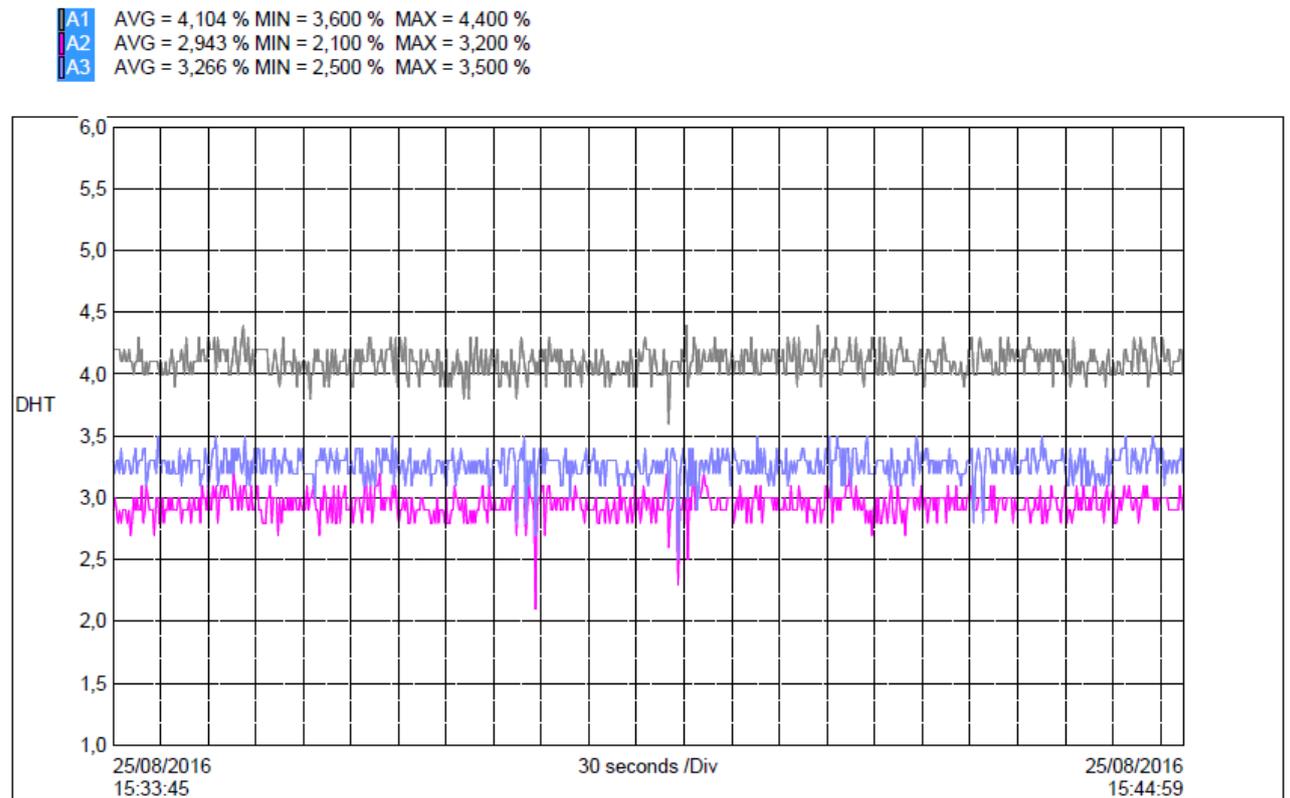
Analisando os resultados para o valor de corrente eficaz para um conversor de um nível na saída após o reator na Figura 89 pode se verificar que, mesmo na saída, a influência da queda de tensão no barramento devido ao conversor CA-CC que alimenta a tesoura é grande, fazendo com que ocorram quedas periódicas na corrente de alimentação do motor.

Figura 89 – Corrente RMS Gravada - CC-CA Multinível



A distorção harmônica da corrente na saída se mantém com um valor baixo durante toda a medição, chegando em média a 3%, como pode se ver na Figura 90. Ou seja, é menor do que as medições realizadas na entrada dos conversores, em que ocorre a distorção da corrente devido ao chaveamento realizado pelos dispositivos de estado sólido.

Figura 90 – DHT de Corrente Gravada - CC-CA Multinível



Pode se verificar pela Figura 91 que o perfil da corrente na saída do reator é próximo ao da senoide pura.

Analisando o comportamento da tensão de saída do conversor de um nível na Figura 92, verifica-se o mesmo efeito encontrado na corrente, ou seja: os seguidos afundamentos de tensão devido à influência do conversor CC-CA existente no barramento. Outro fato que se observa é que, devido ao regime de trabalho ser constante em 44hz, a tensão de saída do conversor permanece próxima de 380V.

Figura 91 – Corrent RMS Instantânea - CC-CA Multinível

| | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| A1 RMS = 43,22 A | Peak- = -63,90 A | Peak+ = 63,90 A |
| A2 RMS = 40,52 A | Peak- = -63,90 A | Peak+ = 59,40 A |
| A3 RMS = 43,39 A | Peak- = -65,50 A | Peak+ = 62,40 A |

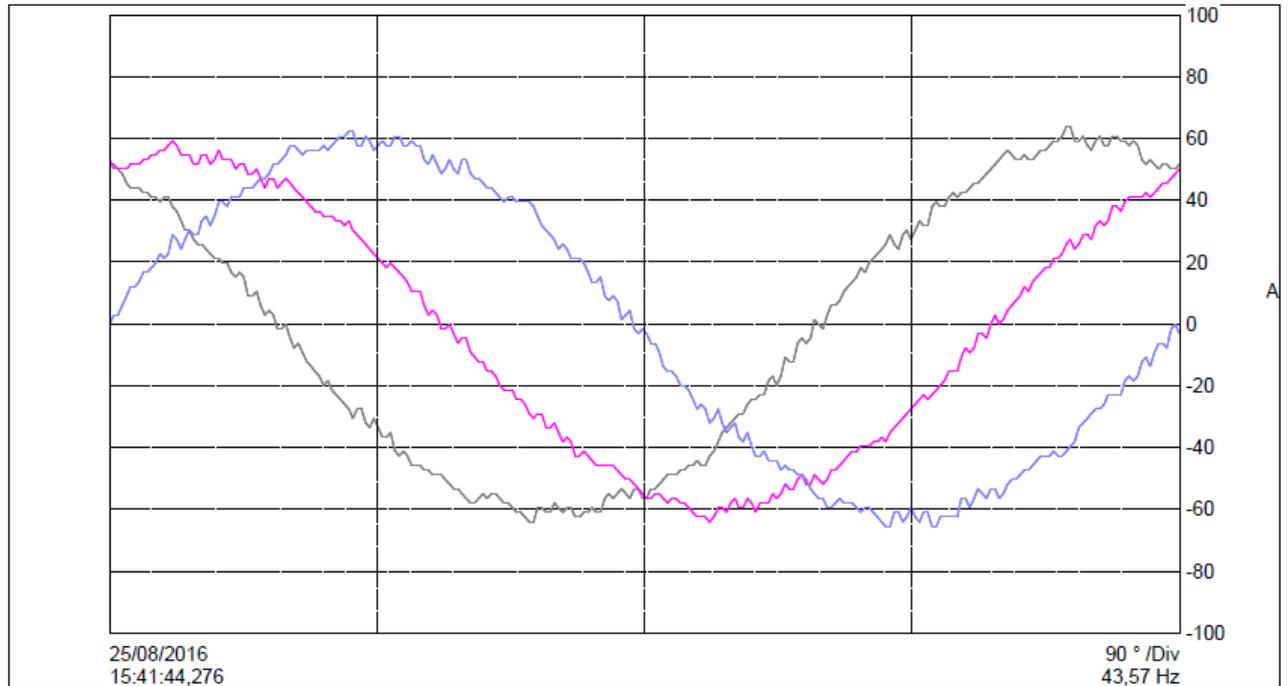
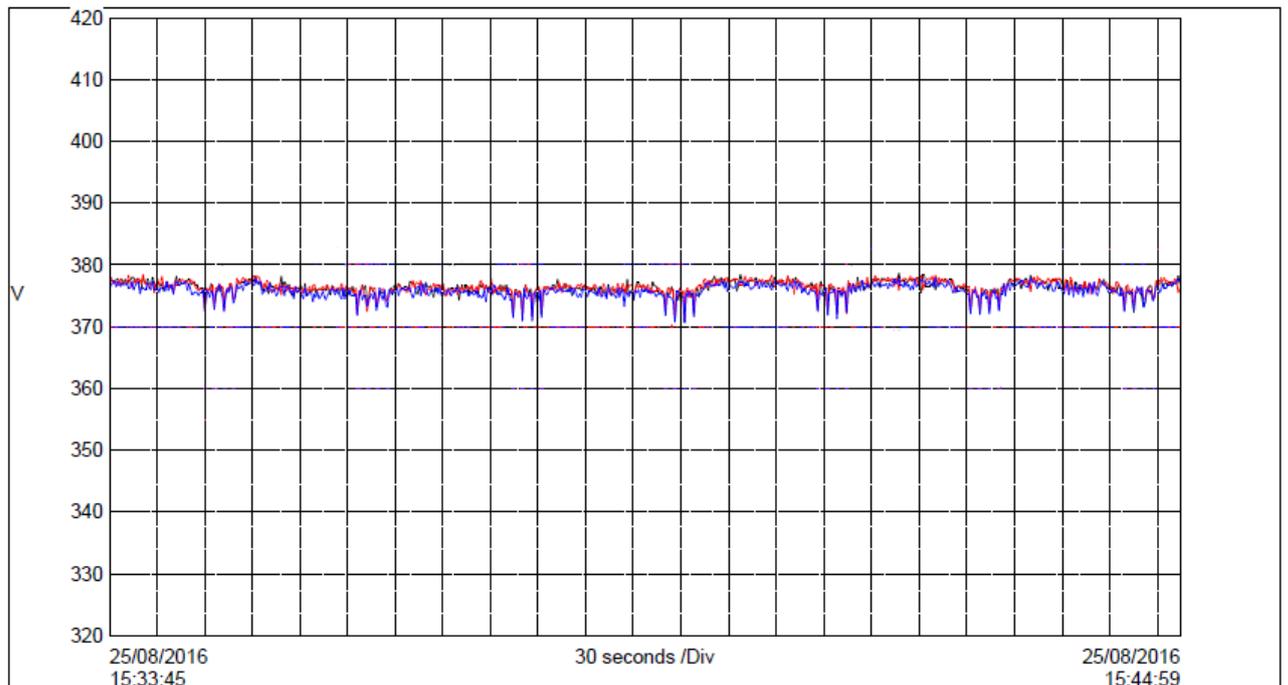


Figura 92 – Tensão RMS Gravada - CC-CA Multinível

| | | | |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| U1 RMS | AVG = 376,4 V | MIN = 350,6 V | MAX = 387,6 V |
| U2 RMS | AVG = 376,5 V | MIN = 353,1 V | MAX = 386,3 V |
| U3 RMS | AVG = 375,9 V | MIN = 351,7 V | MAX = 384,3 V |



A distorção harmônica da tensão apresentada na Figura 93 é mais elevada do que nas

medições anteriores. Contudo, deve-se salientar que a medição é realizada nos terminais do motor e não na entrada do conversor como anteriormente.

A Figura 94 mostra através da forma de onda da tensão a distorção relativamente elevada nos terminais do motor.

Figura 93 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA Multinível

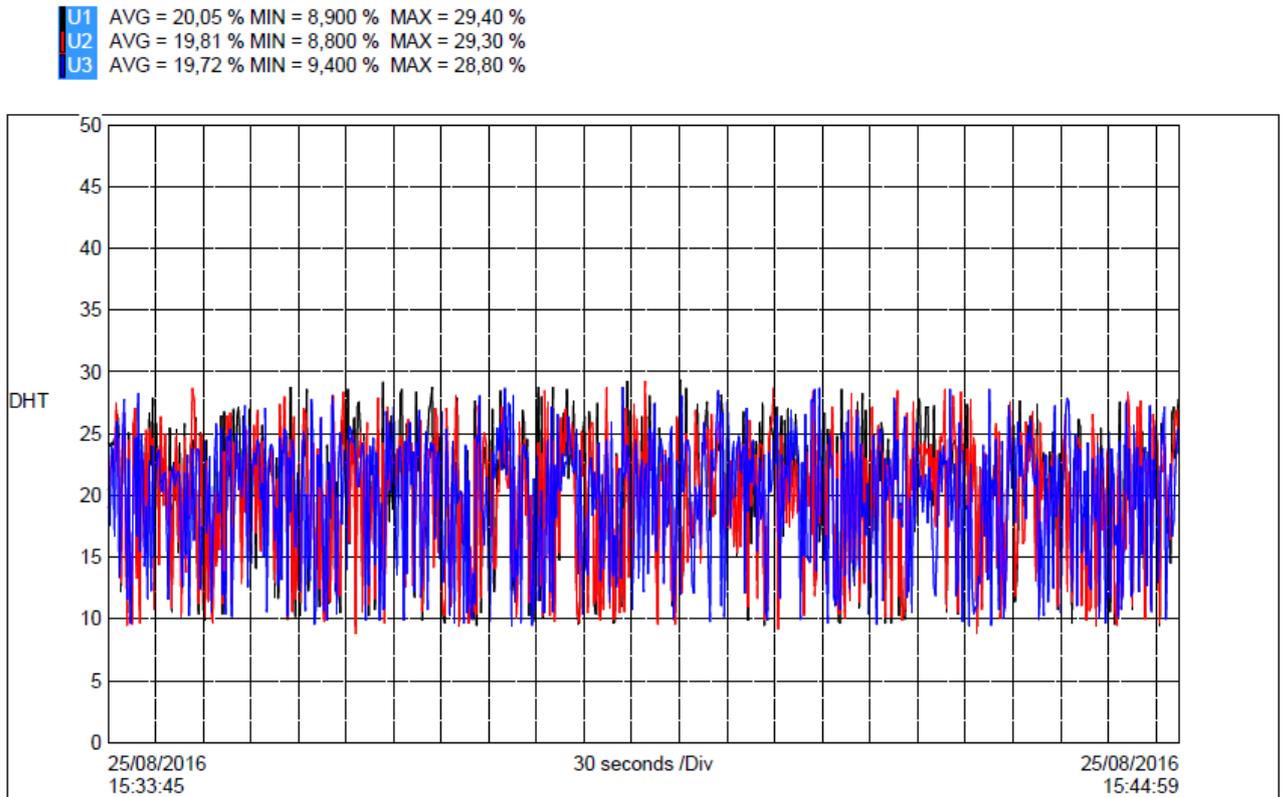
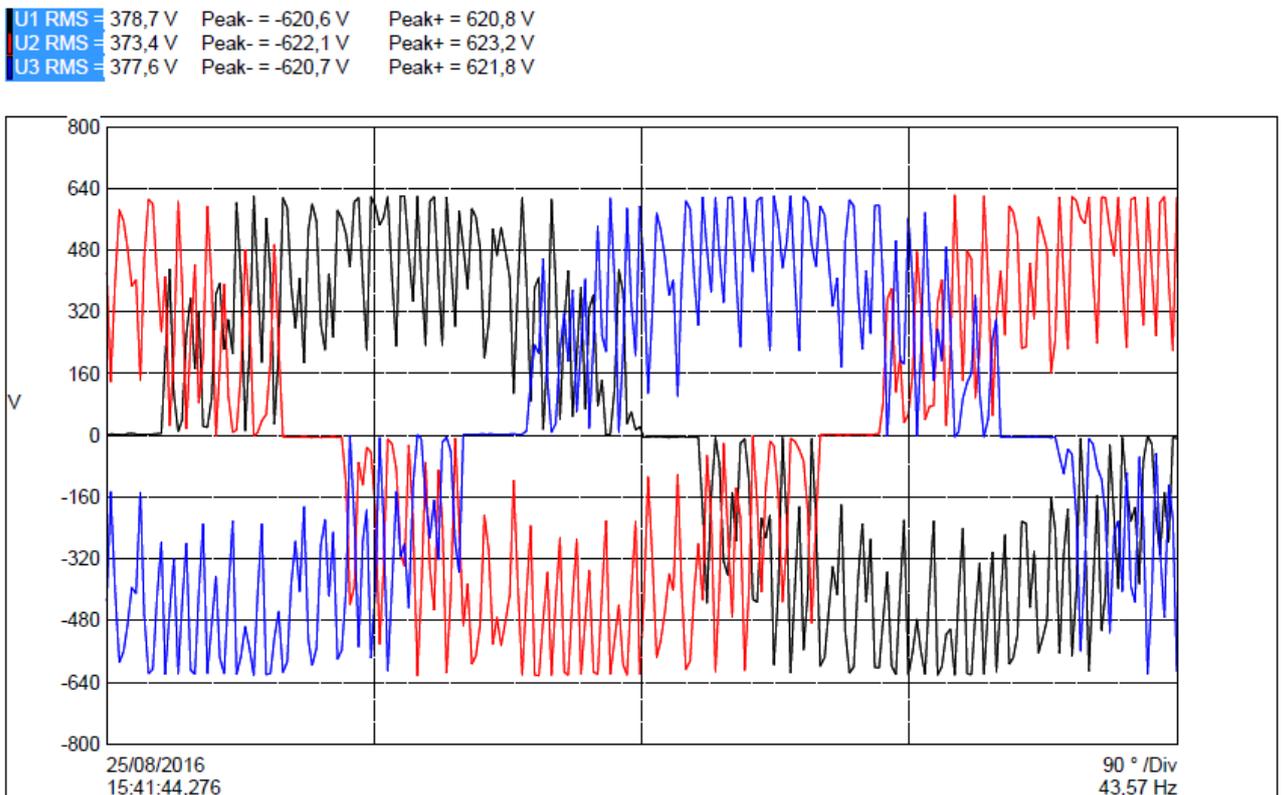


Figura 94 – Tensão RMS Instantânea - CC-CA Multinível

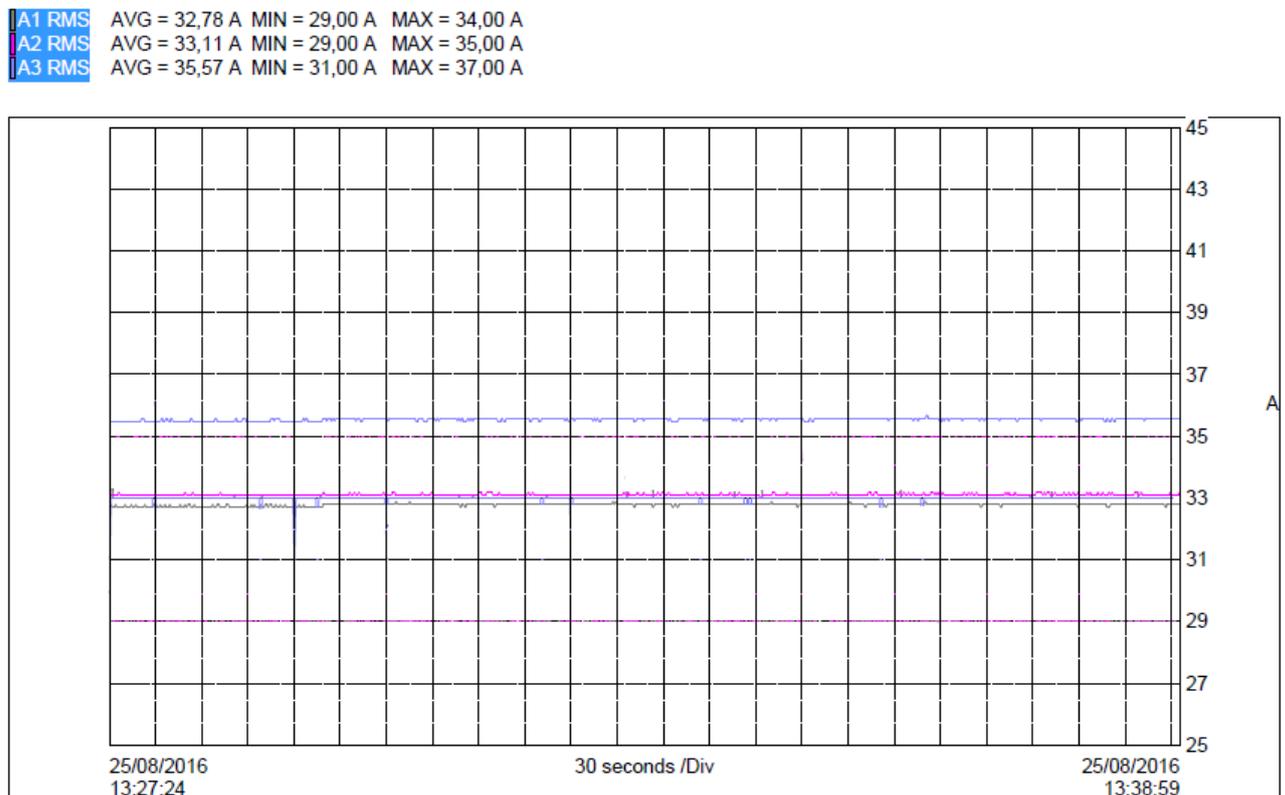


Foi realizada a medição para a mesma carga (12 motores de 3CV), porém com um conversor G7 multinível (3 níveis de tensão no barramento DC).

A modulação PWM realizada em três níveis faz com que a forma de onda resultante se aproxime da onda senoidal pura. Sendo assim, conversores deste tipo desprezam a utilização de reatância de saída, obtendo resultados melhores que os conversores convencionais.

Comparando-se os valores de corrente RMS do conversor da ABB de um nível (Figura 89) com os valores obtidos no conversor G7 na Figura 95, pode se notar que a corrente não sofreu grandes oscilações mesmo estando no mesmo barramento do conversor CA-CC de alimentação da tesoura (Tyrak), o que ocorreu com mais frequência no conversor da ABB.

Figura 95 – Corrente RMS Gravada - CC-CA Multinível



Através da Figura 96, observa-se que um fato semelhante ao do parágrafo anterior ocorreu com o valor da taxa de distorção harmônica da corrente. Observando os valores obtidos na Figura 90, nota-se que os mesmos foram reduzidos de um valor médio de 3,5% para aproximadamente 1%. O efeito da diminuição da distorção é apresentado na forma de onda da corrente na Figura 97.

Figura 96 – DHT de Corrente Gravada - CC-CA Multinível

| | | | |
|----|----------------|----------------|---------------|
| A1 | AVG = 1,641 % | MIN = 1,300 % | MAX = 1,900 % |
| A2 | AVG = 0,9411 % | MIN = 0,7000 % | MAX = 1,200 % |
| A3 | AVG = 1,549 % | MIN = 1,200 % | MAX = 1,800 % |

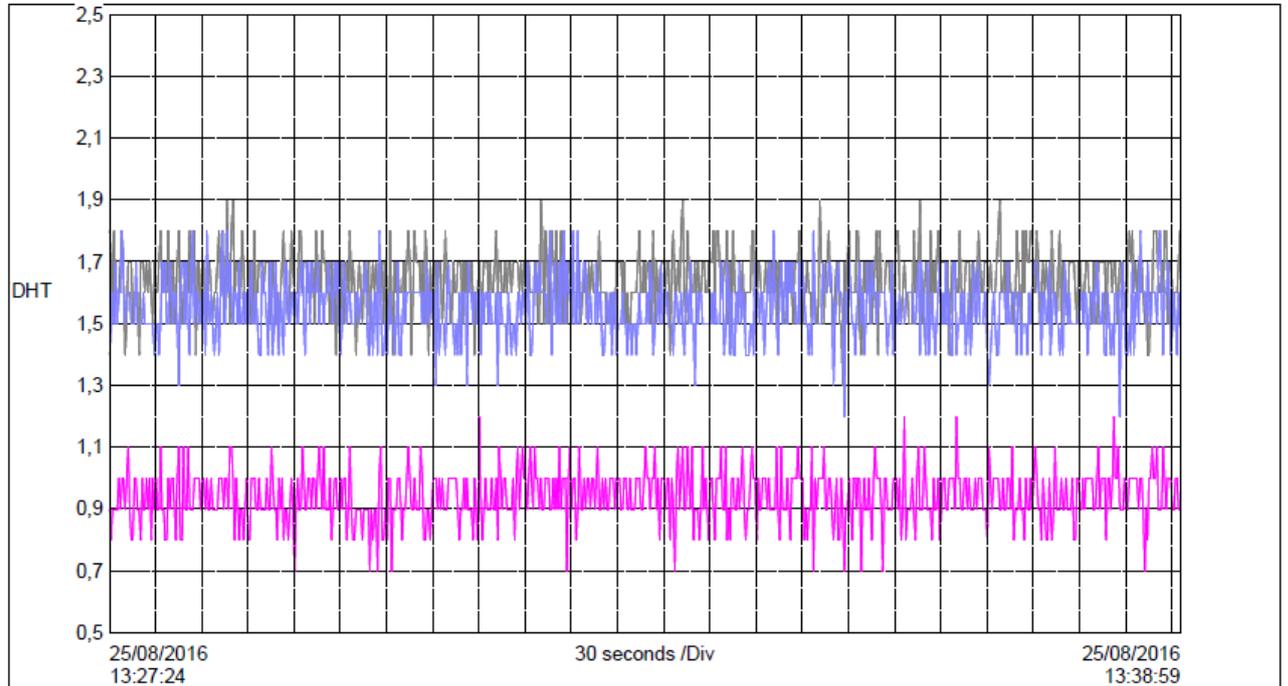
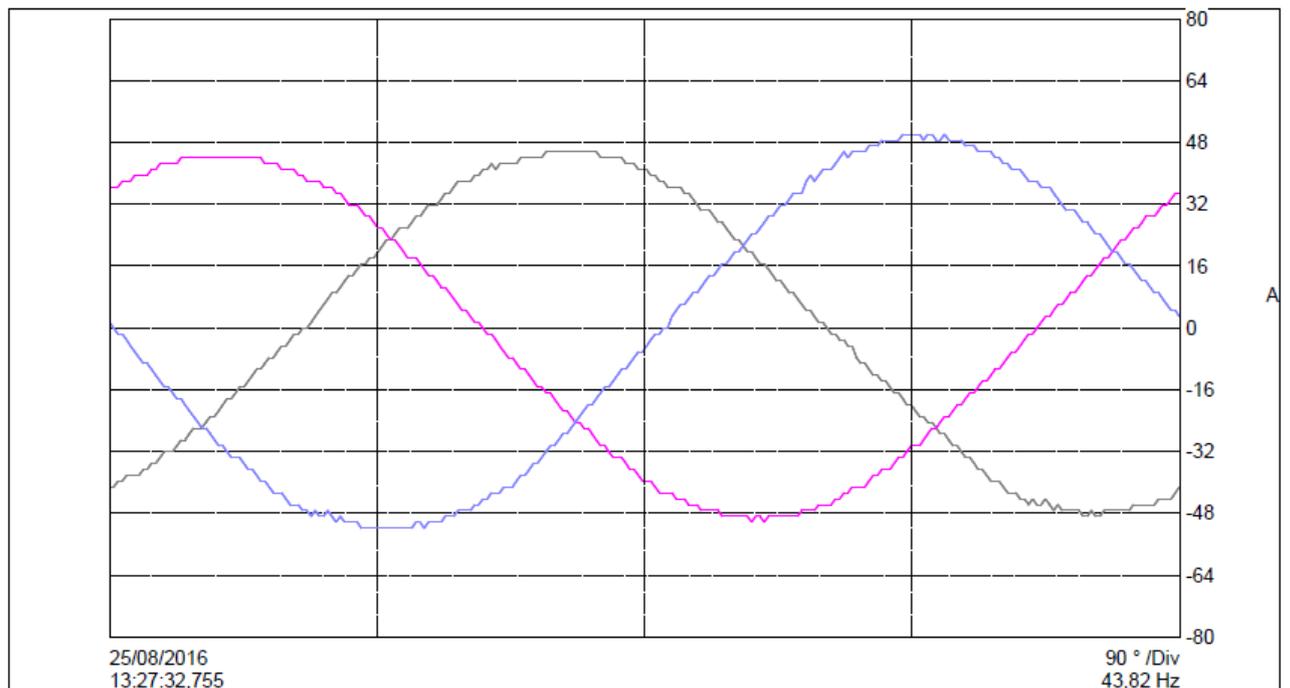


Figura 97 – Corrente RMS Instantânea - CC-CA Multinível

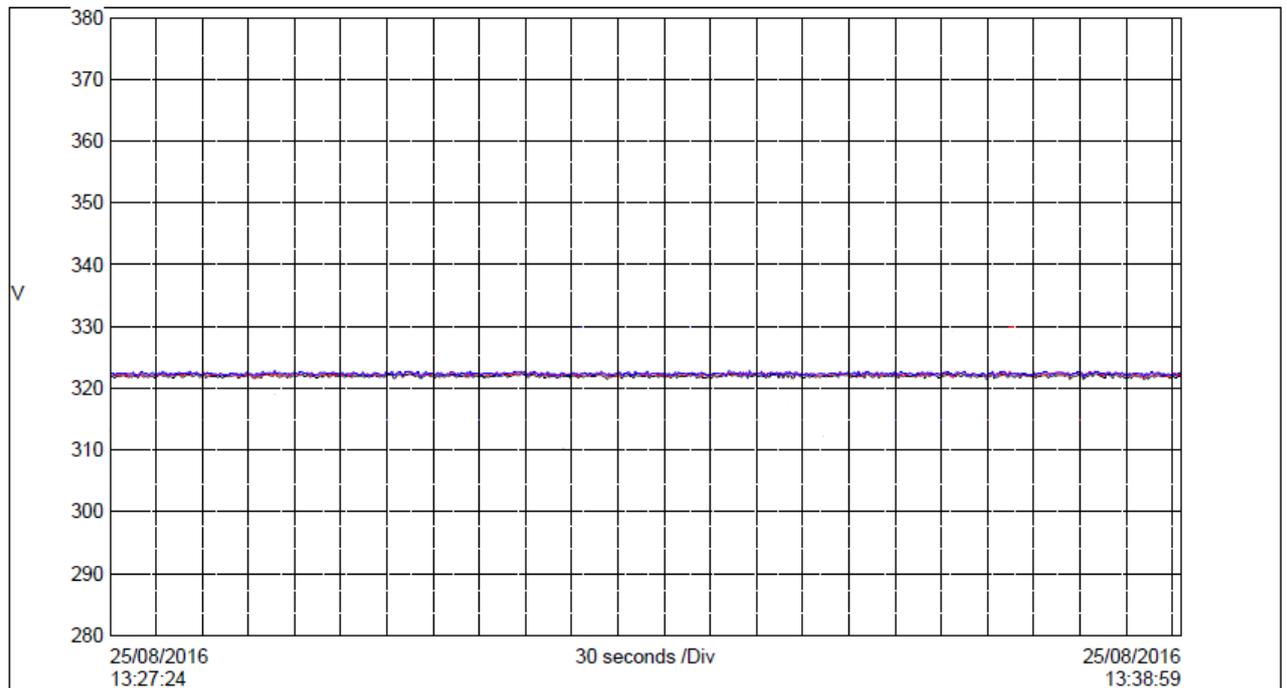
| | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| A1 RMS = 32,84 A | Peak- = -48,70 A | Peak+ = 45,70 A |
| A2 RMS = 33,21 A | Peak- = -50,20 A | Peak+ = 44,10 A |
| A3 RMS = 35,76 A | Peak- = -51,80 A | Peak+ = 50,20 A |



A mesma observação em relação à corrente pode ser feita para a tensão no que diz respeito à influência de equipamentos externos no funcionamento do conversor. Ao se comparar o valor da tensão de alimentação dos motores na Figura 92 com a Figura 98, se nota que, com o conversor G7, a tensão se tornou mais estável e sem os afundamentos provenientes do outro conversor conectado ao mesmo barramento.

Figura 98 – Tensão RMS Gravada - CC-CA Multinível

| | | | |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| U1 RMS | AVG = 322,0 V | MIN = 309,2 V | MAX = 329,3 V |
| U2 RMS | AVG = 322,3 V | MIN = 310,3 V | MAX = 330,8 V |
| U3 RMS | AVG = 322,4 V | MIN = 311,0 V | MAX = 330,3 V |



A maior diferença entre os dois conversores está nos parâmetros de distorção harmônica de tensão. A comparação das Figuras 99 e 100 com as Figuras 93 e 94 mostra que a taxa de distorção harmônica da tensão foi reduzida de aproximadamente 20% para apenas 2,5% em média, o que pode ser notado também no perfil da onda.

Figura 99 – DHT de Tensão Gravada - CC-CA Multinível

| | | | |
|----|---------------|----------------|---------------|
| U1 | AVG = 2,336 % | MIN = 0,8000 % | MAX = 4,500 % |
| U2 | AVG = 2,299 % | MIN = 0,7000 % | MAX = 4,500 % |
| U3 | AVG = 2,224 % | MIN = 0,8000 % | MAX = 4,400 % |

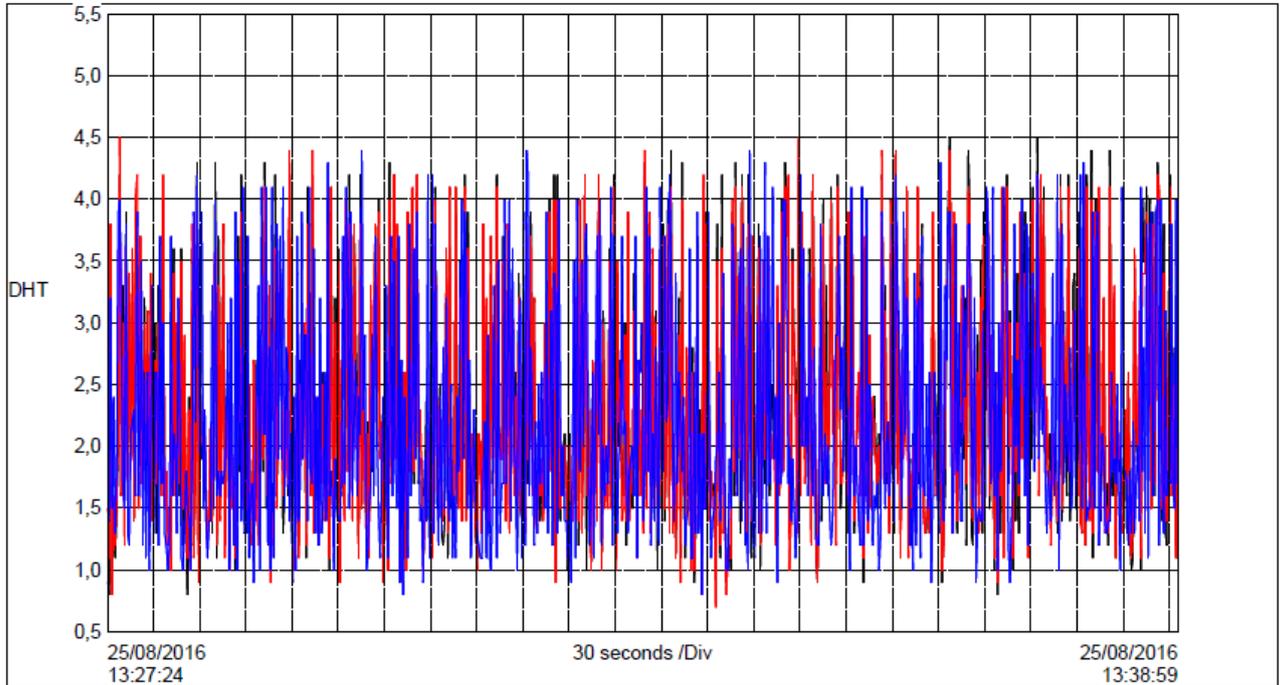
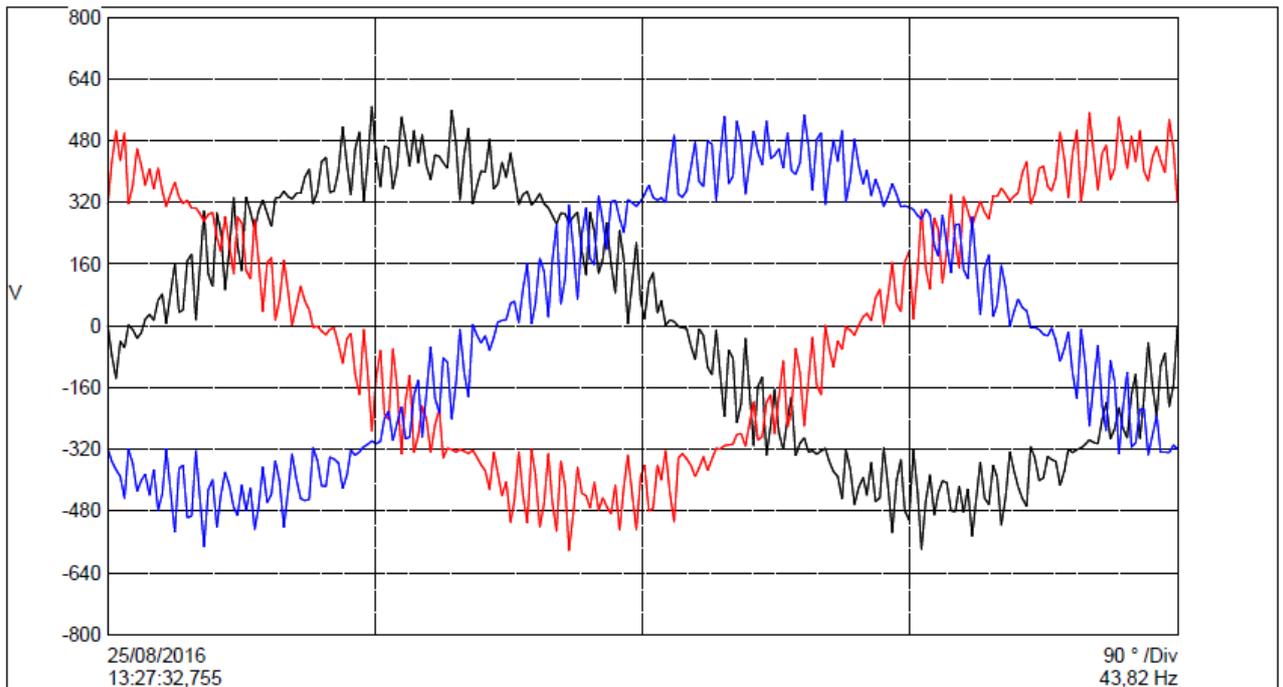


Figura 100 – Tensão RMS Instantânea - CC-CA Multinível

| | | | |
|--------|---------|------------------|-----------------|
| U1 RMS | 322,1 V | Peak- = -578,1 V | Peak+ = 569,0 V |
| U2 RMS | 322,3 V | Peak- = -581,0 V | Peak+ = 553,1 V |
| U3 RMS | 323,5 V | Peak- = -570,8 V | Peak+ = 548,4 V |



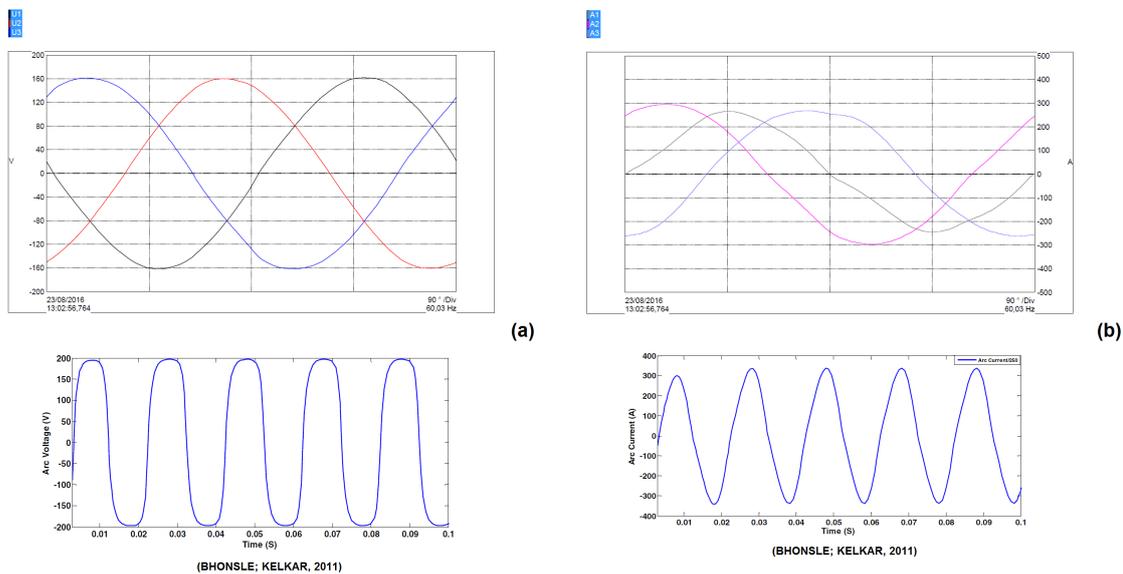
Com esta comparação, pode-se notar que é imprescindível a utilização de reatância série em conversores CC-CA comuns (1 nível de modulação). Porém, os conversores a 3 níveis além de dispensar o uso destas reatâncias, conseguem apresentar resultados ainda mais satisfatórios que os conversores convencionais quando se trata do efeito dos harmônicos na carga.

6 Comparação entre Simulações e Medições

6.1 Forno a Arco

A comparação gráfica entre os resultados das medições e os modelos simulados em Bhonsle e Kelkar (2011) permite concluir que o modelo exponencial foi o que mais se aproximou do comportamento do forno para a etapa de refinamento do aço.

Figura 101 – (a) Tensão Medida e Simulada (b) Corrente Medida e Simulada para o Forno



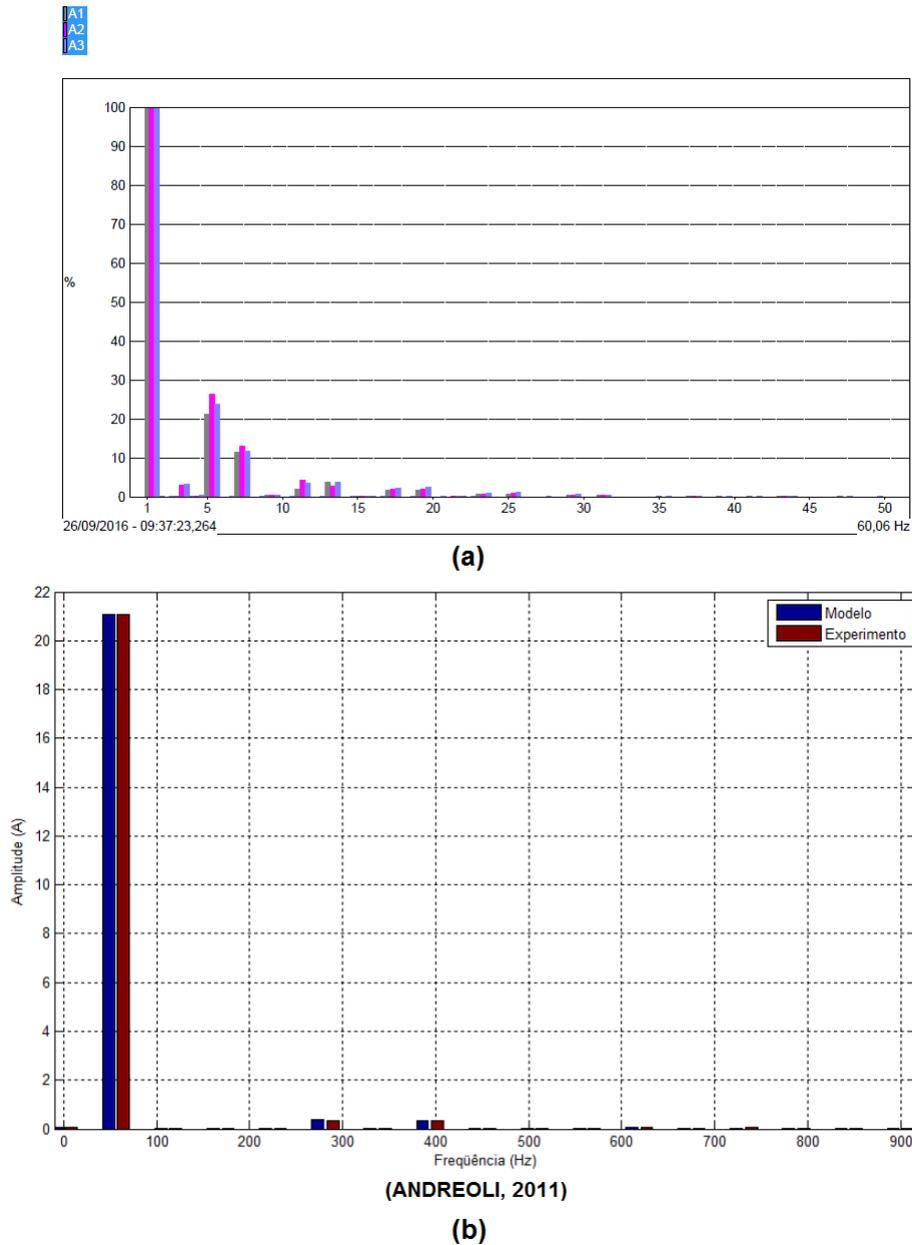
A principal característica deste modelo é representar a não linearidade do forno. Assim como apresentado por Bhonsle e Kelkar (2011), os modelos hiperbólico e completo são adequados para a representação da etapa de derretimento.

6.2 Iluminação

A comparação entre a medição e a simulação para a iluminação é feita através dos resultados obtidos por Andreoli (2011) para uma configuração de quarenta lâmpadas alimentadas por um transformador ligado em delta. Nessa simulação ocorre leve assimetria, sendo a distribuição das lâmpadas da seguinte forma: Fase A = 15 lâmpadas, fase B = 15 lâmpadas e fase C = 10 lâmpadas.

O resultado para a DHI de corrente é visto na Figura 102.

Figura 102 – (a)DHI de Corrente Medida (b)DHI de Corrente Simulada para a Iluminação



Em ambos resultados é vista a predominância dos harmônicos de 5^a e 7^a ordem. Nota-se também a presença das ordens múltiplas de três, que se caracterizam pelo desequilíbrio de carga entre fases.

6.3 Conversores

6.3.1 CA-CC

Através da simulação realizada, é possível observar que os efeitos do *overlap* (característico do funcionamento de conversores CA-CC no acionamento de cargas indutivas) se assemelharam aos resultados obtidos no conversor real.

Quanto às componentes harmônicas individuais, verifica-se que são de mesma ordem ($6n\pm 1$).

O resultado da DHT de corrente para o conversor simulado foi de 27,9%, enquanto no conversor real foi de 25%, mostrando uma aproximação entre o modelo e o conversor real. Para a DHT de tensão, o valor para a simulação foi de 10,4%, sendo o valor da medição que foi de 7,2%. Salienta-se as restrições do modelo com relação ao valor da impedância real do sistema.

6.3.2 CA-CA

Através da simulação realizada, observa-se que a DHT de corrente gerada na partida do motor de indução é de 45%, sendo o valor medido de 48%. Com relação à DHT de tensão, o valor simulado é de 16,5%, sendo o medido de 5,2%. Ocorreu uma diferença entre o valor do modelo e o medido pois se desconhece todos os parâmetros para modelar a impedância equivalente do sistema ao qual o conversor está inserido.

Em regime permanente, com o ângulo de disparo de zero grau, a DHT de corrente se tornou nula tanto na simulação quanto na medição. Porém, a DHT de tensão para a simulação também se tornou nula, enquanto que a DHT de tensão para a medição não. Isso ocorre pois a simulação abrange apenas o conversor CA-CA no sistema. No sistema real, após o término da partida do conversor, a DHT resultante é proveniente das demais cargas presentes no sistema, gerando um nível também baixo de DHT, 0,8% em média.

6.3.3 CC-CA

Para o conversor CC-CA, a DHT de corrente simulada foi de 27,4% em comparação aos 37% do valor medido. A DHT de tensão para a simulação foi de 18,9% , sendo característicos os harmônicos de ordem $6n\pm 1$ por ser um conversor trifásico de 6 pulsos. Para a medição, o resultado da DHT de tensão foi em média de 9%, sendo o motivo da diferença o mesmo do conversor CA-CA.

6.3.4 Resumo dos Resultados dos Conversores

A Tabela 11 apresenta a comparação dos valores obtidos para os conversores com o limite especificado pelo PRODIST.

Tabela 11 – Resumo do Resultado dos Conversores

| Equipamento | DHT de Tensão | | |
|--------------------------------|---------------|-----------|--------|
| | PRODIST | SIMULAÇÃO | MEDIDO |
| CA-CC | 10% | 10,4% | 7,2% |
| CA-CA (Partida - 90°) | 10% | 16,5% | 5,2% |
| CA-CA (Regime permanente - 0°) | 10% | 0% | 0,8% |
| CC-CA | 10% | 18,9% | 9% |

Os valores das medições se mostraram abaixo do indicado pela norma, enquanto os simulados não. Isso é explicado pelas técnicas de redução do conteúdo harmônico adotadas em ambiente industrial que não foram implementadas nas simulações, como é o caso dos filtros de harmônicos.

7 Conclusões

A partir das análises realizadas, pôde se verificar o comportamento da tensão e corrente para os diversos dispositivos eletroeletrônicos que são fontes geradoras de harmônicos existentes em uma planta industrial. As medições foram realizadas na planta da empresa siderúrgica Gerdau na cidade de Barão de Cocais.

Foi possível observar que todos os equipamentos analisados atenderam aos limites máximos de referência de taxa de distorção harmônica, porém é necessário frisar a importância dos reatores instalados em série tanto no forno a arco quanto nos conversores CC/CA de um nível, que reduzem significativamente o nível de distorção harmônica da tensão no barramento. Em relação ao conversor CC/CA multinível, foi possível identificar que a distorção provocada na carga por ele é bem menor que os demais conversores CC/CA de um nível, mesmo com reatores na saída, mostrando assim serem uma excelente opção para utilização no acionamento de motores .

Nos equipamentos analisados no setor da Utilidades não ocorre influência de equipamentos externos já que o sistema elétrico de toda a área é alimentada por um transformador independente. Já os equipamentos da laminação sofrem uma grande influência principalmente do conversor CA/CC que alimenta a tesoura de corte, que ao realizar os cortes periodicamente causa afundamentos de tensão devido à demanda instantânea de altos valores de corrente, alterando assim o comportamento do sistema de iluminação e dos demais conversores presentes no mesmo barramento. Uma análise mais detalhada deste conversor e do seu regime trabalho são uma oportunidade de estudos futuros para que mesmo não excedendo os limites de referência de distorção harmônica, aproveite-se o potencial para uma melhor qualidade da energia do sistema elétrico de toda a planta.

As simulações realizadas apresentaram ordens dos conteúdos harmônicos semelhantes às medições. Contudo, para uma melhor aproximação da magnitude das grandezas mensuradas, é necessário o estudo aprofundado em relação aos parâmetros do sistema. Para o forno e a iluminação, os valores mensurados se aproximaram dos valores obtidos na literatura. Para os conversores, os valores de DHT simulados foram superiores aos mensurados e estabelecidos pelo PRODIST. Isso ocorreu devido à ausência dos fatores mitigadores utilizados na indústria, como é o caso dos filtros de harmônicos.

Referências

- AGUIRRE, M. et al. Analysis and comparison of pwm modulation methods in vsi-fed pmsm drive systems. In: *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 851–857.
- AHMED, A. *Power Electronics for Technology*. [S.l.]: Prentice Hall, 1999.
- ANDREOLI, A. L. *Modelagem de lâmpadas de descarga: uma análise de desempenho considerando parâmetros de qualidade da energia*. 270 P. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodist Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.], 2010.
- ARRILLAGA, N. R. W. J. *Power System Harmonics*. second edition. [S.l.]: Wiley, 2003.
- BHONSLE, D. C.; KELKAR, R. B. Simulation of electric arc furnace characteristics for voltage flicker study using matlab. *2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCEMENTS IN ELECTRICAL, ELECTRONICS AND CONTROL ENGINEERING*, 2011.
- DIAS, G. A. D. *Harmônicas em Sistemas Industriais*. second edition. [S.l.]: EDIPUCRS, 2002.
- DUGAN, R. e. a. *Electrical Power Systems Quality*. second edition. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.
- FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. oitava edição. [S.l.]: LTC, 2015.
- GOLKAR, M. A.; MESCHI, S. Matlab modeling of arc furnace for flicker study. *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008.
- HANSEN, D. IEEE 519 misapplications— point of common coupling issues. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008.
- IEC. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*. [S.l.], 2008.
- IEC. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions*. [S.l.], 2014.
- IEEE. *Std. 519. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. [S.l.], 1992.
- KOPCAK, W. G. da Silva; Marcos Antônio A. de F. I. IEEE standard 519-92 and the harmonic currents caused by the inverter fed induction motor. *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, 2013.

- LAI, T. S. K. J.-S. IEEE and international harmonic standards impact on power electronic equipment design. *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. IECON 97. 23rd International Conference on*, 1997.
- LUDBROOK, A. IEEE 519-harmonic current goals and diversity - a proposal. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, 2001.
- ONS. *Procedimentos de Rede: Sub-Módulo 2.8 – Padrões de Desempenho da Rede Básica*. [S.l.], 2009.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, A. S. *Sinais e Sistemas*. second edition. [S.l.]: Pearson, 2010.
- OSBORNE, H. s. Review of work of sub-committee on wave shape standard of the standards committee. *American Institute of Electrical Engineers*, 1919.
- OWEN, E. L. A history of harmonics in power system. 1998.
- PAICE, D. A. *Power Electronic Converter Harmonics*. [S.l.]: IEEE Press, 1996.
- PRINCE, D. C. Mercury Arc Rectifiers. *American Institute of Electrical Engineers*, 1926.
- RHODES, G. I. Parallel operation of three-phase generators, with their neutrals interconnected. *American Institute of Electrical Engineers*, 1910.
- RISSIK, H. The Influence of Mercury-Arc Rectifiers upon the Power Factor of the Supply System. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1932.
- SIEMENS. *SIKOSTART 3RW22*. [S.l.], 1999.
- SIEMENS. *MICROMASTER 430*. [S.l.], 2005.
- STEINMETZ, C. P. Constant current mercury arc rectifier. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1905.
- SUTHERLAND, P. E.; BRUSSO, B. History of Harmonics. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2015.
- SWAMY, M. M. et al. Case studies on mitigating harmonics in ASD systems to meet IEEE 519-1992 standards. *Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE*, 1994.
- TEIXEIRA, D. Ângelo. *Análise das Distorções Harmônicas – Estudo de Caso de um Sistema Industrial*. 128 P. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- YASKAWA. *DRIVE G7*. [S.l.], 2007.