

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MAUREN POMALIS COELHO DA SILVA**

**PROPOSTA DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA  
ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

Porto Alegre

2014

**MAUREN POMALIS COELHO DA SILVA**

**PROPOSTA DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA  
ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia: Sistemas de Potência

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre

2014

MAUREN POMALIS COELHO DA SILVA

## **PROPOSTA DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Enio Valmor Kassick, IFSC

Doutor pela Institut National Polytechnique de Toulouse – Génie Electrique, França.

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University – Estados Unidos.

Prof. Dr. Felipe Hernández García, FURG

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil.

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, 25 de Março de 2014.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho especialmente à minha filha Ana Livia, razão maior da minha busca pelo crescimento intelectual, profissional e interior. À minha mãe Lilian, por sempre me dar coragem e incentivo para continuar trilhando o meu caminho focada nos estudos e na busca por mais conhecimento. Ao meu pai Luiz, por tudo o que me ensinou em vida, principalmente pelo exemplo de ser um homem bom, bem humorado sempre e amigo. À minha vó Marina, por todas as experiências, histórias e ensinamentos compartilhados comigo, e principalmente pelo exemplo de mulher guerreira e trabalhadora que deixou. À minha irmã gêmea Lauren, por ser sempre minha melhor amiga, estar comigo nos melhores e piores momentos da minha vida, compartilhando de sentimentos únicos, pela amizade verdadeira e inabalável e por ser a melhor ponte com o meu passado. Ao meu companheiro Carlos Henrique, por compartilhar comigo parte de sua vida, pela convivência diária me apoiando e auxiliando no possível. Ao meu padrasto Joaquim, pelo auxílio na minha educação e incentivo constante aos estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de estudar num programa considerado ótimo e de realizar trabalhos em minha área de pesquisa.

À Tractebel Energia pela oportunidade de atuar no projeto de pesquisa na área, e pelo acesso aos dados utilizados para que fosse possível a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas do LASEP pelo apoio no decorrer do tempo de mestrado, principalmente aos companheiros de sala César Orozco, Gabriel Valencia, Lucas Walantus e Sérgio Martínez. Pela ajuda e parceria no projeto de Daphne Schwanz. Pelo interesse e pequenas, mas importantes, contribuições sobre o ATP Draw de Andrés Ricardo Herrera, Gustavo Ferreira, Mario Oliveira, Renato Ferraz, Roger Zulpo, Roberto Cabral e Sérgio Braunstein. Aos demais colegas do LASEP, agradeço a convivência e experiências compartilhadas ao longo do curso.

Ao meu orientador Roberto Chouhy Leborgne, por todo interesse e auxílio no decorrer do mestrado e, principalmente, pela atenção dispensada durante a pesquisa. Ao professor Arturo Bretas pelas contribuições para o projeto.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

*“Esse lampejo guia os barcos até o cais  
mas queima os nossos olhos  
E é pra que numa noite de escuridão  
a gente encontre uma só razão  
para continuar vivendo”*

*(Lucas Silveira)*

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta um estudo de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) no sistema elétrico industrial de uma concessionária geradora de energia elétrica do Brasil. O estudo teve enfoque na distorção harmônica gerada nos serviços auxiliares da usina termoeletrica. Para tanto, foi necessária a simulação e análise da planta da termoeletrica, com atenção nos serviços auxiliares pertencentes a ela, devido aos altos níveis de distorções harmônicas registrados. A simulação foi feita com o programa ATP (Alternative Transients Program) no domínio do tempo, através de sua interface gráfica, o ATP Draw. Nele foram modelados os principais componentes que pertencem ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) em questão, como geradores, transformadores, linhas e cargas não lineares. Com a modelagem do SEP da termoeletrica, é possível determinar os níveis da distorção harmônica em diversos locais da planta, e aprofundar o estudo para que seja possível fazer a mitigação desses distúrbios. A diminuição da distorção harmônica junto ao aumento do fator de potência permite um melhor desempenho da usina, aumentando a faturamento da empresa através do aumento da energia entregue ao sistema elétrico.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia Elétrica, Distorção Harmônica, Geração Termoeletrica, Software ATP Draw.

## **ABSTRACT**

This dissertation presents a study of Power Quality in an electrical system of a thermoelectric power plant in Brazil. The study focused on the harmonic distortion generated in the auxiliary services of the plant. Therefore, it was necessary to simulate and analyze the thermal plant, with attention to auxiliary services belonging to it, due to high levels of harmonic distortion registered. The simulation was performed using the ATP (Alternative Transients Program) in the time domain through its interface, the ATP Draw. It were modeled the main components that belong to the Power System in question, such as generators, transformers, lines and non-linear loads. With the modeling of the thermoelectric plant, is possible to determine the levels of harmonic distortion at various locations within the plant. The reduction of harmonic distortion along with the increase of power factor allows a better plant performance, increasing company revenue by increasing the energy delivered to the electrical system.

**Keywords: Power Quality, Harmonic Distortion, Thermoelectric Generation, Software ATP Draw.**



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	MOTIVAÇÃO .....	20
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	21
2	DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	22
2.1	ORIGEM .....	25
2.1.1	Cargas Lineares.....	26
2.1.2	Cargas Não Lineares.....	27
2.2	PROBLEMAS ASSOCIADOS À DISTORÇÃO HARMÔNICA .....	28
2.2.1	Aquecimento Excessivo .....	29
2.2.2	Atuação de Sistemas de Proteção.....	29
2.2.3	Ressonância.....	30
2.2.4	Alterações de Fator de Potência.....	31
2.2.5	Vibrações.....	32
2.2.6	Outros efeitos.....	32
2.3	NORMAS.....	32
2.3.1	IEEE 519-1992 .....	33
2.3.2	IEC 61000 .....	38
2.3.3	IEC 61000-2-2 .....	39
2.3.4	IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4.....	40
2.3.5	ANEEL – PRODIST Módulo 8 .....	42
3	ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	47
3.1	ESTUDO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	47
3.2	MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	48
3.2.1	Circuitos Trifásicos .....	49
3.2.2	Geradores .....	50
3.2.3	Transformadores .....	51
3.2.4	Cargas.....	56
3.3	MÉTODOS DE SIMULAÇÃO .....	65

3.3.1	Domínio do Tempo .....	65
3.3.2	Domínio da Frequência.....	68
4	ESTUDO DE CASO.....	70
<b>4.1</b>	<b>COMPLEXO TERMOELÉTRICO JORGE LACERDA.....</b>	<b>70</b>
4.1.1	Funcionamento e Características da UTLA .....	71
4.1.2	Serviços Auxiliares.....	73
<b>4.2</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>78</b>
4.2.1	Ferramenta de Simulação – ATP DRAW.....	79
4.2.2	Modelagem do Sistema.....	80
4.2.3	Outros recursos do ATP Draw utilizados.....	95
5	SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	97
<b>5.1</b>	<b>MODELAGEM E SIMULAÇÃO EM FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL.....</b>	<b>98</b>
<b>5.2</b>	<b>MODELAGEM E SIMULAÇÃO COM INJEÇÃO DE HARMÔNICAS.....</b>	<b>104</b>
<b>5.3</b>	<b>RESULTADOS E COMPARAÇÃO.....</b>	<b>109</b>
6	CONCLUSÃO.....	123
<b>6.1</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>124</b>
<b>6.2</b>	<b>ARTIGOS.....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
	<b>ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR UTLA 3 E 4.....</b>	<b>131</b>
	<b>ANEXO B – TABELA DOS VALORES DE R E L DE CADA CIRCUITO TRIFÁSICO.....</b>	<b>132</b>
	<b>ANEXO C – TABELA DE DADOS DOS TRANSFORMADORES.....</b>	<b>133</b>
	<b>ANEXO D – FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA MOTDATPR.....</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXO E – TABELA DE FREQUÊNCIAS E CORRENTES HARMÔNICAS DO PRECIPITADOR, RETIFICADOR E UPS.....</b>	<b>139</b>
	<b>ANEXO F – MODELAGEM COMPLETA DA UNIDADE 3 NO ATP DRAW.....</b>	<b>142</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Representação de Série de Fourier para distorção harmônica.....	23
Figura 2 Soma de ondas harmônicas .....	24
Figura 3 Forma de onda de Carga Linear .....	27
Figura 4 Forma de onda de Carga Não-Linear .....	28
Figura 5 Circuito equivalente de parâmetros concentrados para linha curta.....	49
Figura 6 Modelo de gerador .....	51
Figura 7 Circuito equivalente de um transformador de 2 enrolamentos. ....	52
Figura 8 Núcleo e enrolamentos de um transformador trifásico de dois enrolamentos .....	53
Figura 9 Transformador trifásico de 2 enrolamentos .....	54
Figura 10 Circuito equivalente do Motor de Indução.....	58
Figura 11 Retificador trifásico .....	60
Figura 12 Circuito de uma lâmpada fluorescente .....	61
Figura 13 Circuito de uma lâmpada fluorescente compacta.....	62
Figura 14 Circuito de <i>UPS</i> .....	63
Figura 15 Precipitador eletrostático .....	64
Figura 16 Representação de uma carga não linear através de fonte de corrente .....	65
Figura 17 Sistema de uma Usina Termoelétrica.....	73
Figura 18 Diagrama unifilar com as cargas da Unidade 3.....	75
Figura 19 Modelo RLC3 do ATP Draw. ....	81
Figura 20 Gerador A3 no ATP Draw .....	83
Figura 21 Representação de transformador com modelo BCTRAN. ....	85
Figura 22 Transformadores no ATP Draw. ....	86
Figura 23 Software MOTDATPR .....	88
Figura 24 Modelo de máquina de indução do ATP Draw. ....	89
Figura 25 Modelo do MI completo com nós. ....	90
Figura 26 Distorções harmônicas mais relevantes do Retificador.....	91
Figura 27 Distorções harmônicas mais relevantes do <i>UPS</i> . ....	92
Figura 28 Distorções harmônicas mais relevantes do Precipitador. ....	92

Figura 29 Injeção de corrente no ATP Draw.....	93
Figura 30 Modelo cargas não lineares .....	95
Figura 31 <i>Probe</i> (medidor) de tensão. ....	95
Figura 32 <i>Probe</i> (medidor) de corrente. ....	95
Figura 33 Ícone do <i>switch</i> .....	96
Figura 34 Pontos de medição da UN3. ....	97
Figura 35 Tensão na barra de 230 kV.....	99
Figura 36 Tensão na barra de 13,8 kV.....	99
Figura 37 Tensão na barra de 6,3 kV.....	100
Figura 38 Tensão na barra de 440 V.....	100
Figura 39 Corrente de frequência fundamental do Retificador .....	102
Figura 40 Corrente de frequência fundamental do UPS .....	102
Figura 41 Corrente de frequência fundamental do Precipitador.....	103
Figura 42: Corrente de frequência fundamental do Motor 1 .....	103
Figura 43 Tensão simulada no P4.....	104
Figura 44 Corrente simulada no P4 .....	105
Figura 45 Tensão simulada no P10.....	106
Figura 46 Corrente simulada no P10 .....	106
Figura 47 Tensão simulada no P6.....	107
Figura 48 Corrente simulada no P6 .....	107
Figura 49 Tensão simulada no P8.....	108
Figura 50 Corrente simulada no P8 .....	108
Figura 51 Tensão simulada no P2.....	109
Figura 52 Corrente simulada no P2 .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de Distorção de Tensão [IEEE 519-1992].....	34
Tabela 2: Limites de Distorção de Corrente em Distribuição [IEEE 519-1992].....	35
Tabela 3: Limites de Distorção de Corrente em Subtransmissão [IEEE 519-1992] .....	35
Tabela 4: Limites de Distorção de Corrente em Transmissão [IEEE 519-1992] .....	36
Tabela 5: Limites de Distorção de Tensão [IEEE 519-2012].....	37
Tabela 6: Limites de Distorção de Corrente [IEEE 519-2012] .....	37
Tabela 7: Níveis de compatibilidade para distúrbios harmônicos individuais de tensão - .....	39
Tabela 8: Limites de Harmônicas Individuais de Corrente referente à Fundamental .....	41
Tabela 9: Terminologia das grandezas harmônicas .....	43
Tabela 10: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais .....	44
Tabela 11: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão .....	45
Tabela 12: Submatrizes características usadas em formação de matrizes admitância de transformador (Arrillaga & Watson, 2003).....	56
Tabela 13: Características das cargas principais dos Serviços Auxiliares da Unidade 3 .....	76
Tabela 14: Tempo de arranque dos motores da barra 6,3 kV .....	78
Tabela 15: Dados do circuito .....	82
Tabela 16: Parâmetros do A3 - modelo <i>AC Source</i> .....	83
Tabela 17: Parâmetros do gerador que representa o SIN - modelo <i>AC Source</i> .....	84
Tabela 18: Corrente dos equipamentos.....	93
Tabela 19: Sequência e ângulos conforme a ordem harmônica .....	94
Tabela 20: Tensões nominais x Tensões simuladas no ATP .....	98
Tabela 21: Correntes das cargas .....	101
Tabela 22: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 4 .....	110
Tabela 23: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 4 .....	111
Tabela 24: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 10 .....	112
Tabela 25: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 10 .....	113
Tabela 26: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 6 .....	113
Tabela 27: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 6 .....	114

Tabela 28: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 8 .....	115
Tabela 29: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 8 .....	116
Tabela 30: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 2 .....	117
Tabela 31: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 2 .....	118
Tabela 32: Resumo dos resultados de distorção harmônica nos pontos monitorados .....	119
Tabela 33: P6 - DHT de tensão fora do limite da ANEEL .....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ATP: *Alternative Transients Program*

DHT: Distorção Harmônica Total

EMTP: *Electromagnetic Transients Program*

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC: *International Electrotechnical Commission*

LASEP: Laboratório de Sistemas de Potência

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional

QEE: Qualidade de Energia Elétrica

SEP: Sistema Elétrico de Potência

SIN: Sistema Interligado Nacional

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UPS: *Uninterruptible Power Supply*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Sigma$  = somatório

$\int$  = integral

$\theta$  = ângulo teta

$\varphi$  = ângulo fi

$\omega$  = frequência angular

$\omega_s$  = velocidade angular do rotor

$\pi$  = pi



## 1 INTRODUÇÃO

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é assunto tratado quase diariamente dentro das empresas e órgãos do setor elétrico brasileiro, seja empresa geradora, distribuidora, transmissora, comercializadora ou um órgão regulador ou controlador de energia elétrica. A pauta QEE se tornou tão presente no dia a dia, à medida que os clientes ficaram mais observadores e preocupados com fatores de qualidade relacionados à energia fornecida a residências e empresas.

Além desses agentes ativos da área de energia elétrica, também há uma demanda crescente no estudo e pesquisa sobre os assuntos relacionados com a QEE, feitos dentro de universidades e institutos de pesquisa atuantes na área. Entidades que criam vínculos com empresas ou órgãos para fazer pesquisas que consigam analisar problemas do cotidiano utilizando maior enfoque teórico ou muitas vezes, laboratorial. Esse envolvimento entre empresa e entidade de ensino na pesquisa é cada vez mais comum e só traz benefícios, seja para o setor elétrico, para o ensino ou para a sociedade brasileira.

Um dos principais motivadores de estudo é a distorção harmônica, um distúrbio de energia que gera muitos problemas para concessionárias e consumidores de energia elétrica. As harmônicas são deformações na forma de onda da tensão ou da corrente, essas deformações podem causar danos e prejuízos para várias partes que compõem o sistema elétrico.

O Brasil é um país de proporções continentais, portanto tem um sistema de energia elétrica bastante complexo. A energia faz um longo percurso desde sua geração até cada ponto de abastecimento, por causa disso constantemente os agentes do setor elétrico fazem esforços para que se consiga suprir, com qualidade, cada região desse grande país.

Os distúrbios da QEE podem ser verificados de diversos ângulos diferentes, como por exemplo:

- pelas concessionárias de energia - geração, distribuição, transmissão ou comercialização;
- pelos consumidores - residenciais ou industriais;
- pelos fabricantes de produtos eletroeletrônicos;
- pelos órgãos de regulação e fiscalização.

Já a QEE pode ser conceituada de diferentes maneiras. As mais usuais são:

- As características da energia elétrica disponibilizada ao cliente;
- Presença (ou ausência) de distúrbios que afetam o fornecimento de energia elétrica;
- Capacidade da energia elétrica de propiciar condições ideais de operação de equipamentos;
- Serviço ininterrupto de energia (continuidade de suprimento);
- Energia elétrica fornecida com forma de onda senoidal e pura, sem alterações na sua amplitude.

Mas QEE é basicamente o desempenho do sistema de energia elétrica, considerando-se a continuidade de serviço e a conformidade na forma de onda da tensão (ONS, 2009). Ela é dividida em Qualidade de Serviço e Qualidade de Produto. A qualidade do produto está relacionada com tudo o que diz respeito às características do produto. No caso da energia elétrica, a forma de onda da tensão e a frequência são algumas características técnicas a serem analisadas. Entre os indicadores da qualidade de energia estão: o nível de tensão, a frequência equivalente de violação de tensão e a **distorção harmônica** (Naturesa, 2013).

Qualidade do produto refere-se aos distúrbios relacionados com o fornecimento de energia, mais detalhadamente, a forma de onda da tensão. O sistema de energia elétrico tem parâmetros considerados ideais, que são, segundo Deckmann (2010), **tensões e correntes alternadas, com formas senoidais** (para que esteja assegurada a reversibilidade do processo de conversão eletromagnética é necessário que as variações temporais sejam senoidais); **amplitudes constantes, nos valores nominais** (para que se tenha garantia do nível de potência para cargas passivas de impedância constante); **frequência constante, no valor síncrono** (mantendo o sincronismo entre os diferentes geradores através de um sistema de controle da geração descentralizado); **tensões trifásicas equilibradas** (para garantir que a potência se distribua igualmente entre as três fases); **fator de deslocamento unitário nas cargas** (mantendo o fluxo de potência nas linhas mínimo para atender a uma dada carga); **perdas nulas na transmissão e distribuição** (para se garantir a eficiência do transporte da energia elétrica desde a geração até o consumo). Mas apesar de todas essas informações teóricas sobre os parâmetros ideais de operação da energia elétrica, na prática é quase impossível conseguir tais condições ao mesmo tempo, o que torna muito difícil ter a condição ideal num todo, e nos traz para a condição real, que é a situação que temos atualmente no sistema de energia elétrica.

O estudo em harmônicas é importante para todos os âmbitos que fazem parte do sistema elétrico e ainda traz a possibilidade de se mostrar a preocupação com um futuro próximo, onde será ainda mais necessária a atenção de todos para que se consiga atender parâmetros mínimos de qualidade no que diz respeito, principalmente, ao produto energia elétrica.

Com a utilização de um estudo de caso focado na distorção harmônica é possível que se faça uma análise em uma planta geradora de energia elétrica, considerando as

diversas possibilidades de causas e efeitos das harmônicas. Sendo ainda possível propor soluções para um caso em que há prejuízo devido às harmônicas.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

A motivação deste trabalho partiu pelo interesse no assunto Qualidade de Energia Elétrica, principalmente nos fenômenos que trazem maior repercussão dentro das empresas, por necessitarem maiores cuidados ou controle quando há a presença deles.

A legislação sobre as distorções harmônicas no Brasil ainda não está bem solidificada, portanto, estudos sobre o comportamento desses distúrbios em diferentes níveis de tensão podem ajudar na elaboração de limites e posterior fiscalização deles.

A participação em projeto de pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) junto a outras instituições para tratar de um problema de QEE dentro de uma concessionária geradora de energia elétrica também foi essencial para guiar esta dissertação e proporcionar maior incentivo ao estudo, por se tratar de um caso real.

O Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LASEP) da UFRGS é um dos grupos que colabora com o projeto sobre implantação de filtros para distúrbios harmônicos, dentro da geração termoeétrica da TRACTEBEL ENERGIA, tendo maior contribuição na parte de modelagem do sistema.

## **1.2 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho é analisar as distorções harmônicas que estão ocorrendo nos serviços auxiliares da Unidade 3 da Usina Termoeétrica UTLA, pertencente ao Complexo Termoeétrico Jorge Lacerda da empresa Tractebel Energia. Esses distúrbios são causadores de perdas de energia destinadas ao Sistema Interligado Brasileiro (SIN), portanto é necessário identificar os pontos em que ocorrem as harmônicas, e a relação

delas com as perdas da planta de geração. E também verificar se estes distúrbios estão de acordo com os limites de distorções harmônicas recomendado pelas normas existentes.

A análise se dará com a modelagem e simulação da planta geradora através do software ATP Draw. Nele serão modelados os principais componentes da Unidade 3, entre motores, transformadores, linhas e cargas. E com a aplicação da Transformada de Fourier, serão obtidos os valores das distorções harmônicas, e será identificada então a situação da Unidade 3, tanto quanto suas perdas, quanto a seus limites.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, os próximos capítulos são constituídos pelo seguinte: Capítulo 2: Trata sobre a distorção harmônica, suas causas e efeitos. Apresenta as principais normas sobre o assunto, com limites utilizados para seu controle. Capítulo 3: Neste capítulo é abordada a modelagem para simulação de harmônicas, ou seja, os modelos dos componentes presentes no sistema de potência. E também apresenta os métodos utilizados para esse tipo de simulação. Capítulo 4: Apresenta o estudo de caso, com o histórico, as características e o funcionamento da usina termoeétrica. É dado o local de enfoque do estudo dentro do complexo termoeétrico. É apresentada e definida a metodologia proposta para a pesquisa, e é explicada a modelagem feita no software ATP Draw para representar cada um dos componentes do Sistema Elétrico analisado. Capítulo 5: Neste capítulo são mostradas as simulações obtidas através do sistema modelado e apresentados os resultados obtidos com a simulação. Também é feita a comparação com as medições *in loco* e com a resolução da ANEEL que define os limites cabíveis ao estudo. Capítulo 6: Mostra quais foram as conclusões obtidas com a pesquisa.

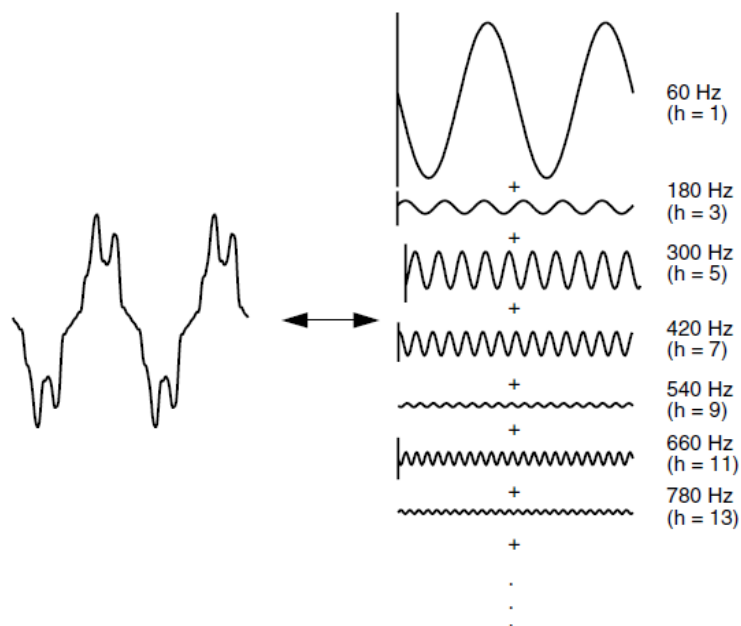
## 2 DISTORÇÃO HARMÔNICA

A presença de harmônicas na rede, como a presença de qualquer outro distúrbio de qualidade de energia elétrica, diminui o desempenho do sistema elétrico e causa mau funcionamento ou danos nos elementos que o compõe.

Harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental, a frequência com que o sistema de abastecimento foi projetado para funcionar. Isto é, se o suprimento de energia é dado com a frequência 60 Hz, como é o caso do Brasil, seus múltiplos serão 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e assim por diante. A frequência múltipla dividida pela frequência fundamental dará a ordem da harmônica ( $h$ ), 1, 2, 3, ...,  $n$ .

$$h = \frac{f_{múltipla}}{f_{fundamental}} \quad (1)$$

Segundo o teorema de Fourier qualquer sinal ou função periódica pode ser representado como a soma de senóides. Quando uma forma de onda é idêntica de um ciclo para o outro, ela pode ser representada como a soma de ondas senoidais puras em que a frequência de cada senóide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. A Figura 1, de Dugan *et al* (2002), representa visualmente esse conceito.

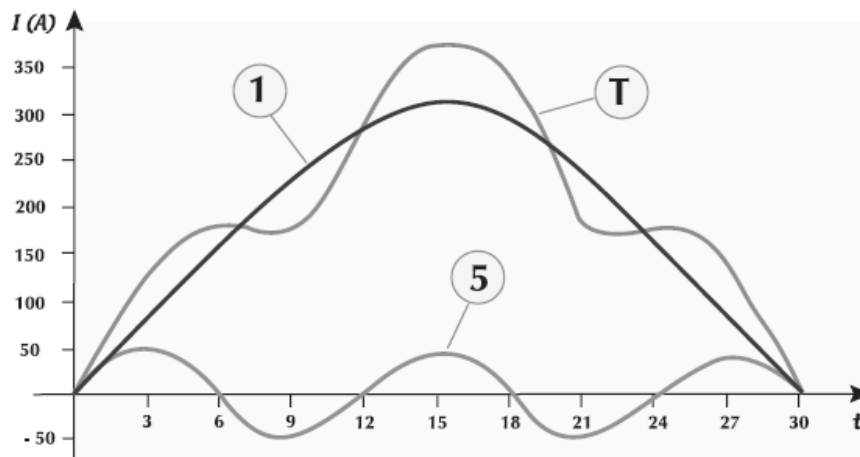


**Figura 1 Representação de Série de Fourier para distorção harmônica**

Observa-se, na Figura 1, do lado direito, diversas senóides perfeitas, porém, cada uma com diferentes amplitudes e frequências. Estas senóides são chamadas harmônicas. A soma de todas elas, ponto a ponto, constitui a onda que aparece do lado esquerdo, totalmente deformada.

Verifica-se que o sistema pode ser analisado separadamente em cada harmônica. Evidentemente que, encontrar a resposta do sistema para cada senóide individual, ou seja, de cada harmônica, é muito mais simples do que encontrar a resposta para o sinal completo. Portanto, a série de Fourier é universalmente aplicada na análise de problemas de harmônicas (Dugan *et al*, 2002).

De uma forma mais simples, na Figura 2, de Moreno (2001), observa-se que através da superposição de duas ondas senoidais 1 e 5, pode-se construir a onda resultante T. Em cada ponto do tempo  $t$  é feita uma soma dos valores de cada senóide, que pode aumentar, diminuir ou também manter o valor, dependendo de quanto cada uma vale naquele ponto.



**Figura 2 Soma de ondas harmônicas**

Pode-se dizer, então, que uma onda periódica contém harmônicas quando seu sinal tem forma de onda não-senoidal, ou seja, um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal puro (Moreno, 2001).

Em Arrillaga & Watson (2003) para o cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT), faz-se a raiz quadrada do somatório do quadrado das harmônicas de corrente ou tensão, da 2ª à 25ª (50ª em algumas normas), em relação à corrente ou tensão fundamental. Conforme mostram as equações, de corrente e tensão (Arrillaga & Watson, 2003) (Dugan *et al*, 2002):

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_F} \quad (2)$$

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_F} \quad (3)$$

Onde  $I_F$  e  $V_F$ , são as correntes e tensões fundamentais. E  $h$  é a ordem harmônica.



As harmônicas podem ser ímpares ou pares, as ímpares existem nos sistemas elétricos em geral e as pares existem no caso de assimetria do sinal devido à presença de componente contínua (Moreno, 2001).

## 2.1 ORIGEM

A preocupação com QEE, e conseqüentemente com as harmônicas, se tornou mais forte em meados da década de 90, quando houve grande aumento de cargas não lineares na rede, equipamentos com funcionamento baseados em eletrônica de potência. Um dos grandes impulsionadores disso em clientes residenciais foi o crescimento do número de computadores pessoais, que trouxe como consequência um perfil de consumo elétrico residencial não somente com aparelhos simples, mas também com equipamentos que provocam deformações nas formas de onda.

Segundo Dugan *et al* (2002), a distorção harmônica é causada por cargas não-lineares no sistema de potência; um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional à tensão aplicada. Ou seja, tendo-se uma tensão senoidal aplicada a uma resistência não linear simples, com a tensão e a corrente variando, enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante é distorcida.

Aumentar a tensão em poucos por cento nos terminais de uma resistência não linear pode resultar numa corrente com o dobro do valor, e então, uma forma de onda diferente, esta é a fonte da distorção harmônica em mais de um sistema de alimentação (Dugan *et al*, 2002).

O aumento da utilização de cargas não lineares pelo consumidor brasileiro é cada vez mais significativo perante o sistema elétrico, e suas harmônicas também. Muitas indústrias fazendo esforços para zelar e conservar sua energia tomam medidas tais como: utilização de lâmpadas fluorescentes, controladores de intensidade luminosa (dimmers),

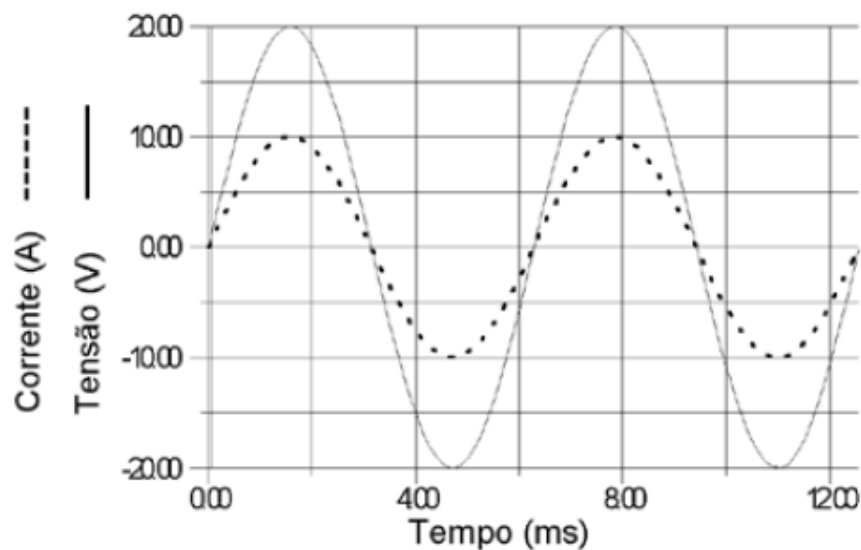
inversores de frequência para controle da velocidade de motores, controladores de potência de chuveiros, e outros. Essas medidas são ótimas para a conservação de energia elétrica, mas trazem como consequência a interferência na QEE, com a distorção harmônica (ELETROBRÁS, 2006).

Conforme Dias (2002) podemos citar também as cargas não lineares ligadas ao sistema, como transformadores saturados, lâmpadas de descarga, retificadores, motores de indução e controladores programáveis.

Algumas características e exemplos de cargas elétricas lineares e não lineares são dadas a seguir.

### **2.1.1 Cargas Lineares**

Esse tipo de carga tem valor de impedância fixo, e é constituído de elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores ou alguma associação deles. As cargas lineares seguem a Lei de Ohm, ou seja, a corrente é proporcional à tensão aplicada, dividida pela sua impedância. Então, se a forma de onda da tensão é senoidal, a da corrente também é. A Figura 3, de ELETROBRÁS (2006), mostra o comportamento de onda da tensão e corrente de um aquecedor.



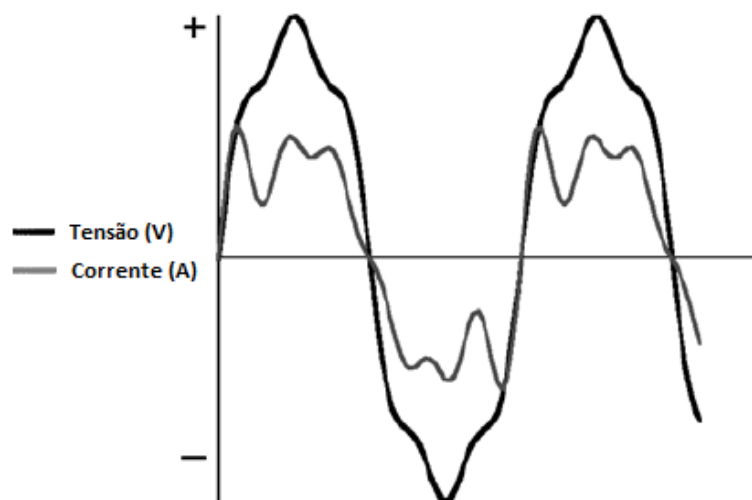
**Figura 3 Forma de onda de Carga Linear**

Alguns exemplos dessas cargas são as lâmpadas incandescentes, aquecedor de água, transformadores de baixa potência (PROCOBRE, 2009).

### 2.1.2 Cargas Não Lineares

A carga não linear é aquela em que a corrente que circula por ela não tem a mesma forma que a tensão que a alimenta (PROCOBRE, 2009).

Esse tipo de carga não apresenta proporcionalidade entre tensão e corrente. E a forma de onda da corrente em um circuito dessa carga é não senoidal, conforme mostra a Figura 4 (ELETROBRÁS, 2006).



**Figura 4 Forma de onda de Carga Não-Linear**

Alguns exemplos de cargas não lineares residenciais são os computadores pessoais, lâmpadas fluorescentes, equipamentos de som e televisão (PROCOBRE, 2009).

Segundo ELETROBRÁS (2006) a qualidade de fontes de tensão e corrente pode ser definida levando-se em conta quatro parâmetros principais, são eles: a frequência, a forma de onda, a amplitude e a assimetria em sistemas trifásicos.

## **2.2 PROBLEMAS ASSOCIADOS À DISTORÇÃO HARMÔNICA**

Diversos danos podem ocorrer quando há a presença de harmônicas em um sistema elétrico, e, em muitos casos, esses danos podem ser irreversíveis. Os efeitos causados pelas harmônicas em uma rede podem atingir componentes de uma instalação, aparelhos ou a própria instalação elétrica. Esses efeitos podem ser notados visualmente, podem ser ouvidos, ou também verificados através dos registros de medidores de temperatura, e em alguns casos, por outros equipamentos adequados à sua detecção (Moreno, 2001) e (Braga, 2012).

As principais formas de manifestação de harmônicas, segundo Moreno (2001) e Braga (2012) são: aquecimento excessivo, disparo intempestivo de dispositivos de proteção, ressonância, redução do fator de potência da instalação, entre outros. E para Braga (2012), alguns efeitos são: vibrações dos aparelhos alimentados, sobreaquecimento ou oscilações da tensão, que fazem afetar o brilho das lâmpadas que iluminam o local, alteração da tensão, entre outros. Ainda segundo o autor, eles devem ser investigados com a utilização de instrumentos apropriados, pois assim, poderá ser detectada de forma eficiente a presença de harmônicas.

A seguir são explicados alguns dos problemas causados pelas harmônicas.

### **2.2.1 Aquecimento Excessivo**

Em diversos casos, as harmônicas são de ordem muito elevadas. Estas correntes harmônicas tendem a circular pelas camadas exteriores do condutor, que significa que a resistência encontrada, devido à distribuição não uniforme da corrente, será maior e também com um aquecimento maior (Braga, 2012).

O aquecimento excessivo pode estar presente nos condutores das instalações elétricas, e nos enrolamentos dos transformadores, motores e geradores (Moreno, 2001).

### **2.2.2 Atuação de Sistemas de Proteção**

Os sinais harmônicos podem ter valores eficazes pequenos, mas se o fator de crista resultante for elevado, pode ocorrer o disparo de algum dispositivo de proteção, devido a um aquecimento ou campo magnético acima do normal provocado pelas harmônicas (Moreno, 2001).

Onde existem muitos computadores, impressoras e equipamentos eletroeletrônicos de importância é comum haver disparos imprevistos, e a consequência pode ser grandes

perdas de informações. Como isso ocorre em casos onde os computadores são alimentados por uma rede comum junto a equipamentos que sejam capazes de gerar harmônicas, o ideal é que se montem circuitos separados - com computadores, impressoras e fotocopiadoras, por exemplo, evitando-se, assim, a perda de operação simultânea de aparelhos (Moreno, 2001). Desta forma e também com o uso de *UPS (Uninterruptible Power Supply)* é possível que não ocorra perda de trabalho e informações, quando houver interrupção do fornecimento de energia (Braga, 2012).

### **2.2.3 Ressonância**

Um elemento capacitivo associado com um elemento indutivo forma um circuito ressonante; esse tipo de circuito é capaz de amplificar os sinais de uma frequência. Um exemplo são os bancos de capacitores colocados em instalações elétricas, muitas vezes para correção do fator de deslocamento. Eles formam circuitos ressonantes devido ao fato das instalações elétricas terem natureza indutiva. O maior problema relacionado a isto é que essa amplificação dos sinais harmônicos pode causar danos, queimas e até explosões de capacitores (Moreno, 2001).

Em um sistema com componentes ideais, a reatância indutiva aumenta diretamente com o aumento da frequência e a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência, então na frequência de ressonância de um circuito LC, a reatância capacitiva se iguala à reatância indutiva (Dias, 2002).

Existem dois tipos de ressonância, a série e a paralela. Para um circuito série, a impedância total na frequência de ressonância se reduz somente à resistência do circuito. No caso de ressonância paralela a impedância tende a valores muito elevados.

### 2.2.4 Alterações de Fator de Potência

Harmônicas também causam efeito na rede, como a redução do fator de potência (Moreno, 2001). Conforme Marques (2011) quando há presença de harmônicas na rede, o cálculo do fator de potência torna-se mais complicado. Na presença de correntes harmônicas, mas considerando a tensão puramente senoidal, o cálculo do fator de potência pode ser realizado segundo a equação (8) obtida a partir da definição geral de fator de potência:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{ef} * I_{ef}} \quad (4)$$

$$FP = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt}} \quad (5)$$

$$FP = \frac{V_{1ef} I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{(V_{1ef}) * \sqrt{I_{CC}^2 + I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} = \frac{I_{1ef} \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{\sqrt{I_{CC}^2 + I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} \quad (6)$$

$$FP = \frac{I_{1ef} \cos(\varphi_1)}{\sqrt{I_{1ef}^2 + I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + \dots}} \quad (7)$$

$$FP = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + DHT_i^2}} \quad (8)$$

Com,

$I_{hef}$  = Corrente eficaz da harmônica de ordem  $h$

$V_{hef}$  = Tensão eficaz da harmônica de ordem  $h$

$\cos(\varphi_1)$  = Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de frequência fundamental (Fator de deslocamento)

$DHT_i$  = Distorção Harmônica Total da corrente

### 2.2.5 Vibrações

As frequências harmônicas podem provocar interferências eletromagnéticas, irradiadas ou conduzidas. Elas podem ocasionar vibrações em quadros elétricos, em transformadores e acoplamentos em redes de comunicação (Moreno, 2001).

### 2.2.6 Outros efeitos

Além dos já citados, existem diversos outros efeitos causados por harmônicas, como por exemplo:

- Erro de medidores de energia;
- Aumento das quedas de tensão;
- Danos em condutores e cabos de rede de energia;
- Danos em máquinas rotativas, como motores ou geradores;
- Interferências telefônicas, como ruídos;
- Interferências na iluminação, como ruídos, e diminuição da vida útil de lâmpadas;
- Diminuição da vida útil de transformadores.

## 2.3 NORMAS

As normas mais conhecidas mundialmente, que estão relacionadas com as distorções harmônicas, são: IEEE 519-1992, IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4. No Brasil, o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional) - módulo 8, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), contém



os valores máximos permitidos para as distorções harmônicas de tensão. A seguir cada norma será explicada, observando os limites de distorção harmônica impostos.

### 2.3.1 IEEE 519-1992

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* é uma associação, fundada em 1963, através da junção das organizações *American Institute of Electrical Engineers (AIEE)*, fundada em 1884, e do *Institute of Radio Engineers (IRE)*, de 1912. A maioria dos membros - cerca de 90% - era dos Estados Unidos quando as organizações se fundiram, atualmente, mais de 50% é de fora do país.

A norma IEEE 519-1992 é uma revisão da norma americana IEEE 519-1981, “*IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters*”, que é um guia com recomendações sobre controle de harmônicas e compensação reativa de conversores estáticos de potência; ela foi publicada em 1981, nos Estados Unidos.

A norma IEEE 519 de 1992 foi denominada “*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”, e apresenta um consenso de guias e práticas recomendadas para consumidores e concessionárias minimizar os impactos de distorções harmônicas ocasionadas por cargas não lineares. Segundo esta norma, o desenvolvimento de limites de distorção harmônica é para que a prática ocorra da seguinte forma:

- O limite de injeção de harmônicas por clientes individuais seja tal que não cause níveis de distorção excessiva de tensão em características normais do sistema.
- E que haja limites da distorção harmônica total de tensão fornecida pela concessionária.

Dessa forma, ela divide a responsabilidade de limitar harmônicas entre usuários finais e concessionárias, onde, os usuários finais são responsáveis pela limitação de injeções de correntes harmônicas e as concessionárias pela limitação de distorção de tensão no sistema de fornecimento (Dugan *et al*, 2002).

A norma IEEE 519-1992 traz os seguintes limites de distorção harmônica de tensão, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1: Limites de Distorção de Tensão [IEEE 519-1992]**

<b>Tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC)</b>	<b>Distorção Individual de Tensão (%)</b>	<b>Distorção Total de Tensão (%) - DHT</b>
$V \leq 69\ 000V$	3	5
$69\ 001V < V < 161\ 000V$	1,5	2,5
$V \geq 161\ 001V$	1	1,5

Ou seja, para tensões de 69 kV ou abaixo, a distorção harmônica de tensão de uma componente harmônica individual deve ter o limite máximo de 3% e para a distorção total de tensão, o máximo é 5%. Quando a tensão está entre 69 kV e 161 kV, as distorções máximas permitidas são 1,5% e 2,5%. E no caso de tensão acima de 161 kV, seus limites máximos são 1% para a distorção individual e 1,5% para a distorção total.

Com referência aos limites de distorção harmônica de corrente, temos as tabelas 2, 3 e 4 que seguem, também da norma IEEE 519-1992. Cada uma das tabelas faz referência a um tipo sistema de rede: na Tabela 2 constam limites para sistema de distribuição (de 120V a 69 kV), na Tabela 3 para subtransmissão (69 kV a 161 kV) e na Tabela 4 para transmissão (acima de 161 kV).

A Tabela 2 mostra valores para tensões de 120 V a 69 kV, conforme a IEEE 519-1992.

**Tabela 2: Limites de Distorção de Corrente em Distribuição [IEEE 519-1992]**

<b>Limites de Distorção Harmônica de Corrente para Sistemas Gerais de Distribuição (120 V a 69 kV)</b>						
Distorção harmônica Máxima de Corrente em percentagem do $I_L$						
Ordem Harmônica Individual (harmônicas ímpares)						
$I_{sc}/I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 a 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 a 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 a 1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares.

\* Todos os equipamentos de geração de energia estão limitados a estes valores de distorção de corrente, independente do  $I_{sc}/I_L$  real.

$I_{sc}$ : corrente máxima de curto-circuito no PAC.

$I_L$ : corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PAC.

Na Tabela 2, observamos que, para cada faixa de ordem de harmônica temos os limites de distorção harmônica, em percentual, de acordo com o  $I_{sc}/I_L$  correspondente. Isto serve para as harmônicas ímpares. As distorções harmônicas pares têm seus limites estipulados em 25% da sua correspondente ímpar.

A Tabela 3 mostra valores de limites para distorção harmônica de corrente em tensão entre 69 kV e 161 kV, também segundo a IEEE 519-1992.

**Tabela 3: Limites de Distorção de Corrente em Subtransmissão [IEEE 519-1992]**

<b>Limites de Distorção Harmônica de Corrente para Sistemas Gerais de Subtransmissão (69 kV a 161 kV)</b>						
Distorção harmônica Máxima de Corrente em percentagem do $I_L$						
Ordem Harmônica Individual (harmônicas ímpares)						
$I_{sc}/I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT
<20*	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5

20 a 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 a 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 a 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares.

\* Todos os equipamentos de geração de energia estão limitados a estes valores de distorção de corrente, independente do  $I_{sc}/I_L$  real.

$I_{sc}$ : corrente máxima de curto-circuito no PAC.

$I_L$ : corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PAC.

A Tabela 3 traz seus dados da mesma forma que a Tabela 2. Isto é, de acordo com a faixa da ordem harmônica e sua correspondente  $I_{sc}/I_L$ , encontra-se o limite máximo permitido para a distorção de harmônica de corrente. As distorções harmônicas pares também estão limitadas a 25% dos valores das ímpares.

A Tabela 4 mostra valores de limites para distorção harmônica de corrente em tensões acima de 161 kV (IEEE 519-1992).

**Tabela 4: Limites de Distorção de Corrente em Transmissão [IEEE 519-1992]**

<b>Limites de Distorção Harmônica de Corrente para Sistemas Gerais de Transmissão (&gt;161 kV)</b>						
Ordem Harmônica Individual (harmônicas ímpares)						
$I_{sc}/I_L$	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DHT
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares.

\* Todos os equipamentos de geração de energia estão limitados a estes valores de distorção de corrente, independente do  $I_{sc}/I_L$  real.

$I_{sc}$ : corrente máxima de curto-circuito no PAC.

$I_L$ : corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PAC.

Conforme mostrado nas tabelas anteriores, a Tabela 4 também mostra valores de limitação de distorção harmônica de corrente. Porém, a  $I_{sc}/I_L$  tabelada traz somente duas faixas, menor do que 50 e maior ou igual a 50.

Existe uma nova versão da IEEE 519, de 2012, intitulada como “*Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems*”, porém ela ainda não foi aprovada, portanto, não deve ser utilizada como documento de conformidade e regulação. As tabelas anteriores, 1 e 4, sofrem mudanças com a publicação da IEEE 519-2012. Conforme é observado nas seguintes tabelas, Tabela 5 e Tabela 6.

**Tabela 5: Limites de Distorção de Tensão [IEEE 519-2012]**

<b>Tensão no PAC (Ponto de Acoplamento Comum)</b>	<b>Distorção Individual de Tensão (%)</b>	<b>Distorção Total de Tensão (%) - DHT</b>
$V \leq 1000 \text{ V}$	5	8
$1001\text{V} < V < 69\ 000\text{V}$	3	5
$69\ 001\text{V} < V < 161\ 000\text{V}$	1,5	2,5
$V \geq 161\ 001\text{V}$	1	1,5

Observa-se, portanto, que é elaborada uma nova divisão, onde a faixa  $V \leq 69\text{kV}$  é subdividida em: ( $V \leq 1000 \text{ V}$ ) e ( $1001 \text{ V} < V < 69\ 000 \text{ V}$ ). Na nova faixa, os valores abaixo de 1 kV têm limites individual de 5% e total de 8%. Para as demais faixas, os limites permanecem iguais.

**Tabela 6: Limites de Distorção de Corrente [IEEE 519-2012]**

<b>Limites de Distorção Harmônica de Corrente para Sistemas &gt;161 kV</b>						
<b>Ordem Harmônica Individual (harmônicas ímpares)</b>						
$I_{sc}/I_L$	<b>&lt; 11</b>	<b><math>11 \leq h &lt; 17</math></b>	<b><math>17 \leq h &lt; 23</math></b>	<b><math>23 \leq h &lt; 35</math></b>	<b><math>35 \leq h</math></b>	<b>DHT</b>
< 25*	1	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
$25 < 50$	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5

$\geq 50$	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75
-----------	---	-----	------	------	------	------

Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares.

\* Todos os equipamentos de geração de energia estão limitados a estes valores de distorção de corrente, independente do  $I_{sc}/I_L$  real.

$I_{sc}$ : corrente máxima de curto-circuito no PAC.

$I_L$ : corrente máxima de demanda de carga (componente de frequência fundamental) no PAC.

A Tabela 6, de Limites de Distorção Harmônicas para Sistemas  $> 161$  kV, também ganha uma nova divisão, onde a faixa  $I_{sc}/I_L < 50$  é subdividida em duas faixas: ( $I_{sc}/I_L < 25$ ) e ( $25 < I_{sc}/I_L < 50$ ).

### 2.3.2 IEC 61000

A *International Electrotechnical Commission (IEC)* é uma organização não governamental, sem fins lucrativos, fundada em 1906. Ela tem sua sede em Genebra, na Suíça, e mais 4 escritórios em outros países, incluindo o Brasil; suas localizações são São Paulo (Brasil), Worcester (Estados Unidos), Sydney (Austrália) e Singapura (Singapura).

As normas do IEC são direcionadas principalmente para os países europeus. A série de normas IEC 61000 é composta por normas que seguem a numeração IEC 61000-1 até IEC 61000-6, pois elas foram divididas em 6 partes:

- Geral (IEC 61000-1-1 a 61000-1-6);
- Meio ambiente (IEC 61000-2-1 a 61000-2-14);
- Limites (IEC 61000-3-1 a 61000-3-15);
- Testes e técnicas de medição (IEC 61000-4-1 a 61000-4-35);
- Guias de instalação e mitigação (IEC 61000-5-1 a 61000-5-9);
- Normas genéricas (IEC 61000-6-1 a 61000-6-6).

As normas que tratam sobre o assunto de harmônicas estão contidas nas sequências numéricas IEC 61000-2 e 61000-3, mais especificamente nas seções IEC 61000-2-2, 610003-2 e 61000-3-4.

### 2.3.3 IEC 61000-2-2

A norma IEC 61000-2-2, “*Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*”, tem enfoque em distúrbios conduzidos através dos circuitos, cuja frequência está na faixa de 0 a 9 kHz, chegando a frequências de até 148,5 kHz para sistemas de sinalização que utilizam a rede de potência. A norma fornece níveis de compatibilidade para sistemas de corrente alternada de baixa tensão até 420 V (monofásico) ou 690 V (trifásico), com frequência nominal de 50 ou 60 Hz. Esses níveis são aplicáveis para o PAC (ponto de acoplamento comum).

A norma diz que existem harmônicas com efeitos de longo prazo e de muito curto prazo; os de longo prazo são efeitos térmicos em cabos, transformadores, motores, capacitores, etc. E os de curto prazo, referem-se principalmente aos efeitos perturbadores sobre dispositivos eletrônicos que podem ser suscetíveis a níveis harmônicos sustentados por três segundos ou menos.

Os níveis de compatibilidade para distúrbios de tensão harmônica com efeitos de longo prazo são, segundo a norma IEC 61000-2-2, conforme mostra a Tabela 7.

**Tabela 7: Níveis de compatibilidade para distúrbios harmônicos individuais de tensão - em baixa tensão.**

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem (h)	DHI (%)	Ordem (h)	DHI(%)	Ordem (h)	DHI (%)

5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27x(17/h)-0,27$	$21 \leq h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25x(10/h)+0,25$

DHI= Distorção Harmônica Individual

O nível de compatibilidade correspondente para a distorção total de tensão é 8% (DHT = 8%).

A Tabela 7 mostra uma divisão de harmônicas em ímpares múltiplas de 3, ímpares não-múltiplas de 3 ou pares. E dependendo da ordem harmônica é dado o limite de distorção individual de tensão para cada um dos tipos.

Com referência a efeitos de muito curto prazo, os níveis de compatibilidade dos componentes individuais de harmônicas da tensão são os valores dados na Tabela 7, multiplicada por um fator k, onde k é o seguinte:

$$k = 1,3 + 0,7 (h - 5)/45 \quad (9)$$

E o nível de compatibilidade correspondente para a distorção harmônica total é THD = 11%.

### 2.3.4 IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4

As normas IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4 estabelecem limites para harmônicas de correntes emitidas por equipamentos elétricos e eletrônicos em baixa tensão. A diferença entre uma e outra norma é que a IEC 61000-3-2 é aplicada a equipamentos com corrente nominal menor ou igual a 16 A por fase, e a IEC 61000-3-4 é para equipamentos com corrente nominal acima de 16 A por fase.



A norma IEC 61000-3-2, “Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)” estabelece limites para emissões de correntes harmônicas em equipamento com corrente de entrada  $\leq 16$  A por fase. Ela trata da limitação de correntes harmônicas injetadas no sistema de abastecimento público, especificando limites de componentes harmônicos da corrente de entrada produzidos por equipamentos divididos nas classes A, B, C e D.

A IEC 61000-3-4, “Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A”, estabelece a limites de emissões de correntes harmônicas em sistemas de alimentação de baixa tensão para equipamentos com corrente nominal superior a 16 A. A norma recomenda ter seus limites aplicados em sistemas de distribuição dos tipos:

- tensão nominal até 240 V, monofásico, dois ou três condutores;
- tensão nominal até 600 V, trifásico, três ou quatro condutores.

Ambos com frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz.

Os limites da norma IEC 61000-3-4 são conforme a Tabela 8.

**Tabela 8: Limites de Harmônicas Individuais de Corrente referente à Fundamental**

<b>Ordem harmônica (h)</b>	<b>Distorção harmônica máxima <math>I_h/I_1</math> (%)</b>	<b>Ordem harmônica (h)</b>	<b>Distorção harmônica máxima <math>I_h/I_1</math> (%)</b>
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2	29	0,7

15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

$I_1$  = corrente nominal de frequência fundamental.

### 2.3.5 ANEEL – PRODIST Módulo 8

Os parâmetros de qualidade de energia elétrica no Brasil - entre eles as Harmônicas - são conceituados, regulados e fiscalizados pela ANEEL através do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

O PRODIST, atualmente, está dividido em 9 módulos, composto pelos seguintes títulos:

- Módulo 1 - Introdução
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- Módulo 5 - Sistemas de Medição
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações
- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição
- **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos

O PRODIST teve sua primeira versão aprovada em 2008, com a Resolução Normativa nº 345/2008, e no decorrer dos anos vem sofrendo modificações e revisões de acordo com o contexto do sistema elétrico brasileiro. O módulo de interesse, Módulo 8 – sobre QEE – sofreu 4 revisões:

- Revisão 1: Resolução Normativa nº 395/2009, vigorou de 01/01/2010 a 31/12/2010;
- Revisão 2: Resolução Normativa nº 424/2010, vigorou de 01/01/2011 a 05/09/2011;

- Revisão 3: Resolução Normativa nº 444/2011, vigorou de 06/09/2011 a 31/01/2012;
- Revisão 4: Resolução Normativa nº 469/2011 tem data de vigência 01/02/2012 e é a atualmente utilizada.

Conforme este módulo, os procedimentos de QEE definidos devem ser observados por diversos tipos de agentes, como, consumidores, distribuidores, transmissores, os produtores de energia, que é o caso da Usina Termoelétrica.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a QEE costuma ser dividida em Qualidade Comercial, Qualidade do Serviço e Qualidade do Produto. Para iniciar um estudo sobre harmônicas, deve-se ter o conhecimento da parte da QEE que diz respeito à Qualidade do Produto.

Dentro do módulo 8 do PRODIST encontramos a seção 8.1, sobre Qualidade do Produto, onde são definidas terminologias, caracterizados os fenômenos e estabelecidos os parâmetros de conformidade de tensão em regime permanente.

Ainda nessa seção são estabelecidos critérios de amostragem e valores de referência relativos à tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda. Tratando-se de QEE, o PRODIST considera os seguintes aspectos da Qualidade do produto: tensão em regime permanente, fator de potência, **harmônicas**, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração, variação de frequência.

O capítulo 4, da seção 8.1, do Módulo 8 do PRODIST trata do assunto de harmônicas, e neste capítulo encontra-se a seguinte terminologia, conforme a Tabela 9:

**Tabela 9: Terminologia das grandezas harmônicas**

<b>Identificação da Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DHI %
Distorção harmônica total de tensão	DHT %

Tensão harmônica de ordem h	$V_h$
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$h_{máx}$
Ordem harmônica mínima	$h_{mín}$
Tensão fundamental medida	$V_1$

E as expressões para os cálculos, que também constam no capítulo 4, da seção 8.1, do Módulo 8 do PRODIST, são apresentadas a seguir.

Para a distorção harmônica individual de tensão, DHI %

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (10)$$

E para a distorção harmônica total de tensão, DHT %, a fórmula é dada na equação (2).

Segundo a ANEEL, para os cálculos de DHT, o espectro harmônico considerado deve compreender a faixa de frequências que inicie com a componente fundamental e finalize, no mínimo, com a harmônica de ordem  $h=25$ .

O PRODIST apresenta como valores de referência os limites das distorções harmônicas total de tensão e individual de tensão. O documento lembra ainda que os valores servem como referência para o planejamento elétrico em termos de QEE, e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

As tabelas que trazem os limites, segundo o PRODIST são a Tabela 10 e a Tabela 11.

**Tabela 10: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais**

---

**Limites das distorções harmônicas totais - em porcentagem da tensão fundamental**

---

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão – DHT (%)
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	3

$V_n$  = Tensão nominal

Observamos na Tabela 10 os limites para distorção harmônica de tensão baseadas na faixa da tensão nominal.

**Tabela 11: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão**

Ordem harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5

	>21	1	0,5	0,5	0,5
	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
Pares	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Cada país é responsável por fixar limites de tolerância de distorção harmônica, e normalmente isto é feito de acordo com a situação do sistema elétrico existente. No Brasil, através do Prodint da ANEEL e dos Procedimentos de Rede do NOS, somente existe a limitação para distorção harmônica da tensão, não há limitação para a distorção harmônica de corrente.

### 3 ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

#### 3.1 ESTUDO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O estudo de distorção harmônica é utilizado no intuito de verificar-se a distribuição das correntes e tensões harmônicas, e os índices de distorção harmônica em um sistema de energia. Costuma-se aplicar esse tipo de estudo em pesquisas de ressonância e de configuração de filtros para harmônicas, como também quando há outros efeitos de harmônicas no sistema de potência (Das, 2012).

Segundo Arrillaga & Watson (2003) a análise harmônica é o processo de cálculo das magnitudes e fases das harmônicas, fundamentais e de ordem superior, da forma de onda periódica. A série resultante, conhecida como a série de Fourier, estabelece uma relação entre função no domínio do tempo e função no domínio de frequência.

Conforme Figueiredo (2006) o estudo e análise dos sistemas de distribuição requer a modelagem de:

- Cargas não lineares, quando há presença delas.
- Dispositivos principais do sistema de distribuição.

O que resulta, frequentemente, na necessidade de desenvolvimento de modelos complexos; em alguns casos, algoritmos de cálculos; dados completos dos dispositivos do sistema e experimentação para validar os modelos propostos (Figueiredo, 2006).

Numa abordagem muito simples, a análise rigorosa de harmônicas envolve e depende da interação entre o equipamento causador de harmônica e o sistema de energia, das limitações práticas da modelagem de cada componente de um sistema de energia grande, da extensão em que o sistema deve ser modelado para a precisão, e dos tipos de componentes e modelos de fontes não lineares (Das, 2012).

### 3.2 MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A modelagem é a forma de representar componentes de um sistema ou mesmo um sistema como um todo, que esteja sob análise. Modelos são a forma de descrever componentes reais estruturando-os matematicamente, levando em conta suas características.

A simulação é a forma de se estudar o comportamento de sistemas reais através de seus modelos. Com o uso de simulações é possível verificar o que pode ocorrer com o sistema em diferentes casos, devido à modificação de suas características, seja pela inclusão ou pela eliminação de fatores que compõem o sistema de estudo. Normalmente o uso da simulação como ferramenta de estudo é feito quando: o sistema está em planejamento; o sistema existe, porém seria muito caro fazer experimentos nele; o sistema existe, porém o caso de análise é inapropriado ou perigoso.

Em estudos de distorções harmônicas muitas vezes é necessária a utilização de ferramentas de simulação para observar como funciona um sistema, em seu estado atual e com possíveis alterações futuras. E, dependendo dos parâmetros e dados disponibilizados, é possível fazer uma análise mais precisa.

Conforme Das (2012) em uma base simples, a simulação harmônica é muito parecida com a simulação de fluxo de carga. Os dados da impedância de um estudo de curto-circuito podem ser usados e modificados para os efeitos da frequência mais elevada. Além dos modelos de cargas, transformadores, geradores, motores, etc., os modelos de fontes de injeção harmônicas, fornos a arco, conversores, etc., estão incluídos. Estes não estão limitados a harmônicas características e um espectro completo das cargas harmônicas pode ser modelado.

Os parâmetros para modelagem de componentes de um sistema elétrico são o R, L e C (Resistência, Indutância e Capacitância). Esses parâmetros estão presentes em todo o



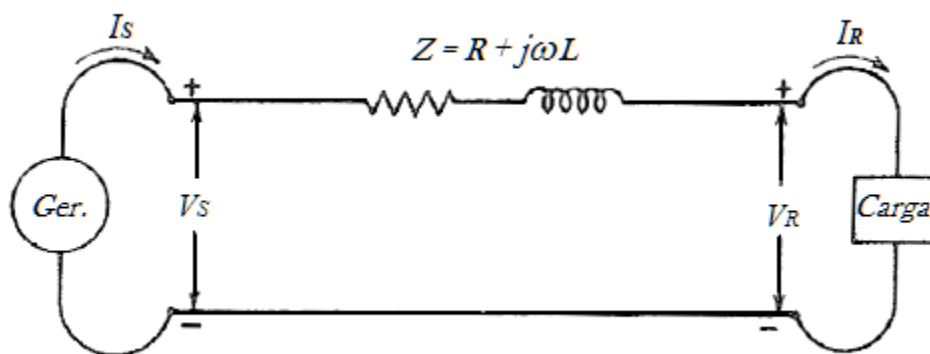
circuito ou equipamento elétrico, em diferentes proporções. A seguir serão explanados alguns modelos de componentes presentes em sistemas de energia elétrica.

### 3.2.1 Circuitos Trifásicos

A linha de distribuição é o principal meio de conexão entre os componentes que fazem parte da rede, sendo, portanto, um caminho de propagação de harmônicas no sistema elétrico.

A definição do modelo das linhas de distribuição é uma parte importante na modelagem do sistema de energia para estudo e análise de harmônicas. Dependendo do comprimento e características da linha há possibilidades maiores ou menores de haver propagação de distorções harmônicas.

O modelo mais simples é o  $\pi$  (Pi), encontrado em Stevenson (1986), onde, usando parâmetros concentrados para linha aéreas, em uma linha curta (de até 80 km) pode-se desprezar a capacitância em derivação existente, por ser muito pequena e não influenciar na precisão do resultado. Dessa forma, consideram-se apenas os parâmetros Resistência em série,  $R$ , e a Indutância em série,  $L$ , para o modelo. A Figura 5 de Stevenson (1986) mostra a configuração RL para linhas curtas.



**Figura 5** Circuito equivalente de parâmetros concentrados para linha curta

Onde  $Z$  é a impedância total da linha,  $I_S$  e  $I_R$  são as correntes nas barras transmissora e receptora, e  $V_S$  e  $V_R$  são as tensões ao neutro na mesma barra. A equação (11), descreve a fórmula da impedância  $Z$  para linhas curtas.

$$Z = R + j\omega L \quad (11)$$

Com,

$R$  = Resistência (ohm)

$L$  = Indutância (mH)

$\omega$  = frequência angular ( $2\pi f$ )

Ainda segundo o autor, para linhas médias (de 80 km a 240 km) os parâmetros concentrados utilizados são  $R$ ,  $L$  e a metade da capacitância ( $C/2$ ) ao neutro por fase concentrada em cada extremidade do circuito equivalente. O estudo deste trabalho é dado com linhas curtas, portanto o modelo utilizado é dado na Figura 5, utilizando-se a equação (11). Esta equação da impedância complexa pode ser reescrita, sendo generalizada para outros componentes que serão vistos neste capítulo, conforme a equação (12).

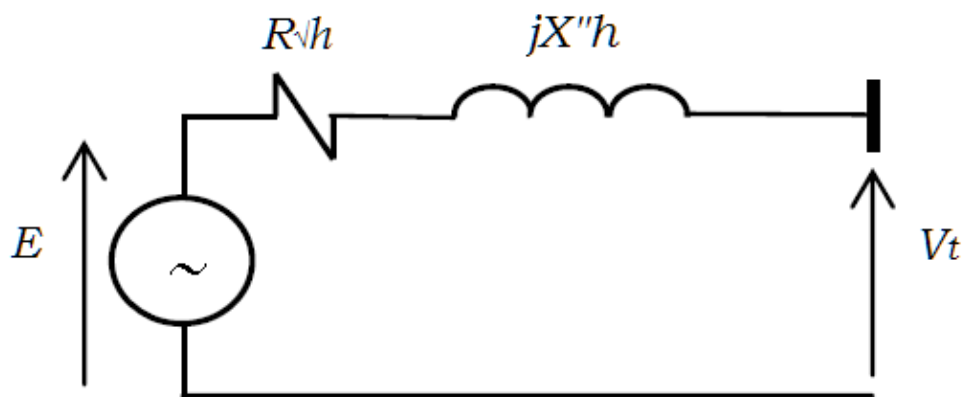
$$Z = R\sqrt{h} + jXh \quad (12)$$

$h$  = ordem harmônica

### 3.2.2 Geradores

Geradores são dispositivos que transformam energia mecânica em energia elétrica. O modelo do gerador do sistema é essencial para a análise de harmônicas em um sistema de geração de energia elétrica.

Segundo Arrillaga & Watson (2003) para a determinação das impedâncias harmônicas da rede, os geradores podem ser modelados como uma combinação em série da resistência e da reatância indutiva. A Figura 6 mostra esta configuração.



**Figura 6 Modelo de gerador**

O cálculo da impedância harmônica do gerador é dado através da equação (12).

Com,  $R$ , a resistência de armadura na frequência fundamental,  $X''$ , a reatância subtransitória do gerador,  $h$ , a ordem harmônica da frequência. Sendo,  $R$  obtida a partir das perdas de potência ativa da máquina.

Um modelo mais simplificado, que considera somente a reatância síncrona, é utilizado para operação em regime permanente.

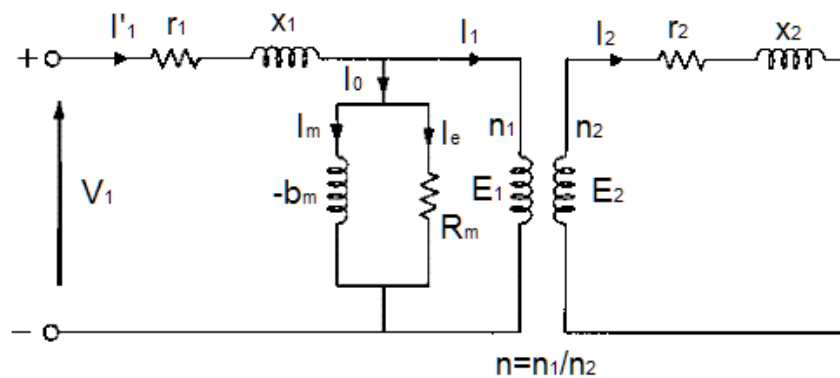
### 3.2.3 Transformadores

Transformadores são componentes muito importantes dos sistemas de potência, eles estão presentes nos sistemas com a função de elevar ou abaixar a tensão existente nas linhas para permitir a transmissão de energia em tensões elevadas e diminuir as perdas ativas. Sua modelagem, o mais aproximado possível, é importante na análise de distorções harmônicas.

Transformadores trifásicos são normalmente encontrados em subestação de distribuição onde a tensão é transformada do nível de transmissão ou subtransmissão para o nível de distribuição. Na maioria dos casos, o transformador da subestação será uma

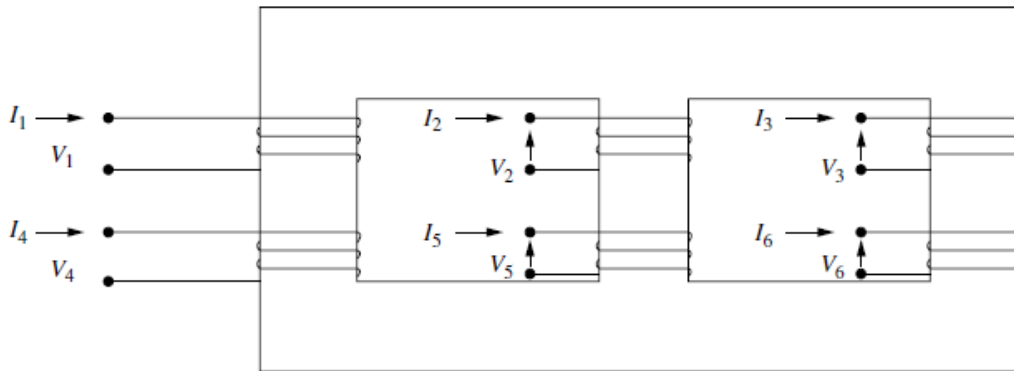
unidade trifásica, com alta tensão sem tap e, baixa tensão com mudança de tap (Kersting, 2007).

O tipo de transformador mais usual é o trifásico com dois enrolamentos. Este é o tipo de transformador que é mais encontrado em sistemas de subtransmissão e distribuição. O circuito equivalente de um transformador de dois enrolamentos pode ser visualizado na Figura 7 de Das (2012). E a Figura 8, de Arrillaga & Watson (2003), mostra o desenho simplificado do núcleo e enrolamentos de um transformador trifásico de dois enrolamentos.



**Figura 7** Circuito equivalente de um transformador de 2 enrolamentos.

Onde,  $r_1$  é a resistência no primário,  $x_1$  é a reatância de dispersão do primário,  $r_2$  é a resistência no secundário,  $x_2$  é a reatância de dispersão no secundário,  $R_m$  é a resistência de magnetização e o  $-b_m$  está representando a reatância de magnetização.



**Figura 8 Núcleo e enrolamentos de um transformador trifásico de dois enrolamentos**

Supondo que os caminhos de fluxo são simetricamente distribuídos entre todos os enrolamentos, a relação entre as correntes e tensões é representada pela equação (13) (Arrillaga & Watson, 2003):

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p & y'_m & y'_m & -y_m & y''_m & y''_m \\ y'_m & y_p & y'_m & y''_m & -y_m & y''_m \\ y'_m & y'_m & y_p & y''_m & y''_m & -y_m \\ -y_m & y''_m & y''_m & y_s & y'''_m & y'''_m \\ y''_m & -y_m & y''_m & y'''_m & y_s & y'''_m \\ y''_m & y''_m & -y_m & y'''_m & y'''_m & y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde,

$y_m$  = admitância mútua entre bobinas de mesmo núcleo.

$y'_m$  = admitância mútua entre bobinas primárias.

$y''_m$  = admitância mútua entre bobinas primárias e secundárias em diferentes núcleos.

$y'''_m$  = admitância mútua entre bobinas secundárias.

$y_p$  = admitância no primário.

$y_s$  = admitância no secundário.

Se existisse um enrolamento terciário, a rede primária consistiria em nove, ao invés de seis, bobinas acopladas e seu modelo matemático seria uma matriz admitância 9 x 9.

Conforme Arrillaga *et al* (1997), os transformadores podem ser representados por um modelo de impedância na frequência fundamental representado por uma resistência em série com uma reatância de dispersão, conforme mostrado na equação (12), entretanto, tais componentes tem de considerar o efeito da dependência da frequência.

Em Arrilaga & Watson (2003) é proposto utilizar uma modelagem simples, em que a resistência é corrigida na presença de altas frequências, conforme pode ser verificado através da equação (14) que representa a admitância do transformador.

$$Y_{th} = \frac{1}{R\sqrt{h} + jX_1 h} \quad (14)$$

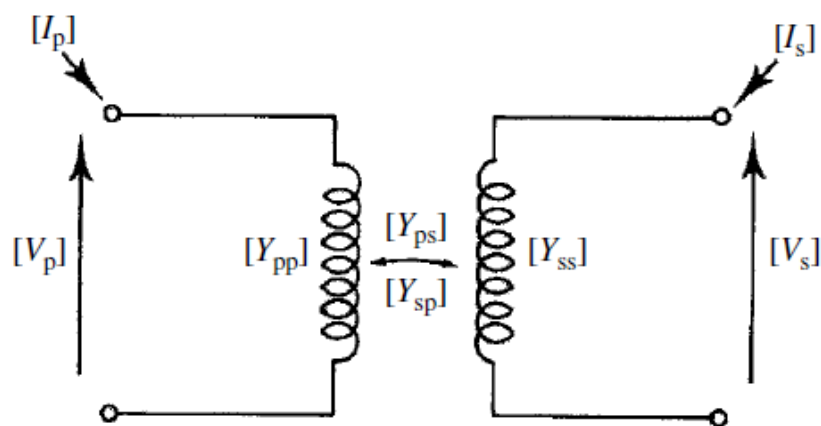
Sendo,

$R$  = resistência na frequência fundamental.

$X_1$  = reatância de dispersão do transformador na frequência fundamental.

$h$  = a ordem harmônica da frequência.

Conforme Arrillaga & Watson (2003), em geral, qualquer transformador trifásico de dois enrolamentos pode ser representado por duas bobinas acopladas, conforme mostrado na Figura 9, do mesmo autor.



**Figura 9** Transformador trifásico de 2 enrolamentos

A equação que descreve a Figura 10 é a eq. (15).

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

É importante lembrar também que as ligações trifásicas do transformador devem ser corretamente modeladas para análise do fluxo de carga do sistema elétrico. Segundo Kersting (2007) nos sistemas elétricos de potência podem existir transformadores com diversos tipos de ligações, como:

- Delta - Estrela aterrada
- Estrela não aterrada – Delta
- Estrela aterrada - Estrela aterrada
- Delta – Delta
- Estrela aberta - Delta aberto

Segundo Arrillaga & Watson (2003) se os parâmetros das três fases são assumidos como equilibrados, todas as ligações trifásicas comuns podem ser modeladas por três submatrizes básicas. As submatrizes  $[Y_{pp}]$ ,  $[Y_{ps}]$  ou  $[Y_{sp}]$  e  $[Y_{ss}]$  que são dadas na Tabela 12, para as ligações comuns em termos das seguintes matrizes, das equações (16), (17) e (18):

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_t & & \\ & y_t & \\ & & y_t \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$Y_{11} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$Y_{111} = \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \\ & -y_t & y_t \\ y_t & & -y_t \end{bmatrix} \quad (18)$$

**Tabela 12: Submatrizes características usadas em formação de matrizes admitância de transformador (Arrillaga & Watson, 2003)**

Conexão do Transformador		Admitância própria		Admitância mútua
Barra P	Barra S	$Y_{pp}$	$Y_{ss}$	$Y_{ps}, Y_{sp}$
Estrela G	Estrela G	$Y_1$	$Y_1$	$-Y_1$
Estrela G	Estrela	$Y_1$	$Y_{11/3}$	$-Y_{11/3}$
Estrela G	Triângulo	$Y_1$	$Y_{11}$	$Y_{111}$
Estrela	Estrela	$Y_{11/3}$	$Y_{11/3}$	$-Y_{11/3}$
Estrela	Triângulo	$Y_{11/3}$	$Y_{11}$	$Y_{111}$
Triângulo	Triângulo	$Y_{11}$	$Y_{11}$	$-Y_{11}$

G: aterrada

Então, para qualquer tipo de ligação trifásica de transformador, usando-se a Tabela 12 e as matrizes  $Y_1$ ,  $Y_{11}$  e  $Y_{111}$ , pode-se calcular a admitância referente ao tipo de transformador.

### 3.2.4 Cargas

Segundo Arrillaga & Watson (2003), não há um equivalente de carga geral admitido para análise harmônica, existem diversos modelos equivalentes para a representação de cargas lineares e não-lineares no sistema elétrico de potência. Em cada caso, a derivação de condutância e susceptância equivalente em faixas harmônicas de específicos fluxos de energia, P (ativa) e Q (reativa), irá precisar de informações adicionais sobre a composição real da carga. Normalmente, concessionárias distribuidoras de energia elétrica têm uma



ideia razoável da proporção de cada tipo de carga no seu sistema, em função da hora do dia, e podem fornecer tal informação.

Existem basicamente três tipos de carga: passiva, máquinas/motores e dispositivos eletrônicos de potência (Arrillaga & Watson, 2003).

#### ***3.2.4.1 Cargas Passivas***

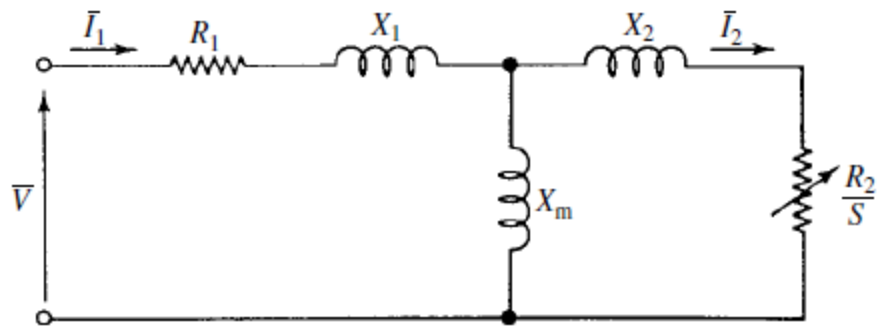
As cargas passivas, tipicamente domésticas, podem ser predominantemente representadas por um modelo aproximado de uma impedância em série, conforme a equação (12). Sendo, neste caso,  $R$ , a resistência da carga na frequência fundamental,  $X$ , a reatância da carga na frequência fundamental e  $h$ , a ordem harmônica.

#### ***3.2.4.2 Motores***

Os motores são parte essencial na indústria; os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica. Dentre vários tipos, o mais comum para a indústria é o motor de indução trifásico, que representa cerca de 80% da quota de utilização, ele tem um princípio de funcionamento simples, requer pouca manutenção e é fisicamente robusto.

O motor de indução é assim chamado por possuir a propriedade de auto induzir um campo magnético no rotor através do campo magnético do estator, criado pela corrente alternada de alimentação (Gonçalves, 2008); em muitos desses motores, o acionamento é dado através de conversores de potência.

Os motores de indução são representados através do circuito simplificado da Figura 10, para representação em estudos de harmônicas, conforme Arrillaga & Watson (2003).



**Figura 10** Circuito equivalente do Motor de Indução

Onde,

$R_1$  = Resistência do estator.

$R_2$  = Resistência do rotor referida ao estator.

$X_1$  = Reatância de dispersão do estator.

$X_2$  = Reatância de dispersão do rotor referida ao estator.

$X_m$  = Reatância de magnetização.

$S$  = Escorregamento.

Conforme Arrillaga & Watson (2003) se a impedância de magnetização for ignorada. A impedância do motor, em qualquer frequência, é dada também pela equação (12). Sendo,

$$X = X_1 + X_2 \quad (19)$$

E,

$$R = R_1 + R_2/S \quad (20)$$

Com  $X$  e  $R$  em uma determinada ordem harmônica,  $h$ .

O cálculo do escorregamento,  $S$ , é dado pela equação (21).

$$S = \frac{\omega - \omega_s}{\omega} \quad (21)$$

Com,

$\omega$  = frequência angular

$\omega_s$  = velocidade angular do rotor

### ***3.2.4.3 Dispositivos com eletrônica de potência***

Segundo Arrillaga & Watson (2003) a modelagem das cargas com eletrônica de potência é um problema mais difícil, pois, além de serem fontes harmônicas, estas cargas não apresentam configuração R, L, C fixa, e suas características não lineares não podem ser incluídas dentro do modelo equivalente linear. Na ausência de informações detalhadas, as cargas com eletrônica de potência são frequentemente deixadas em circuito aberto ao calcular impedâncias harmônicas. No entanto, suas impedâncias harmônicas efetivas precisam ser consideradas quando as potências são relativamente elevadas, tais como fornos a arco, fundições de alumínio, etc.

A maioria das cargas não lineares é decorrente de eletrônica de potência, que estão presentes em muitos dos equipamentos que compõem o sistema elétrico, como retificadores, inversores, conversores (Ndiaye, 2006).

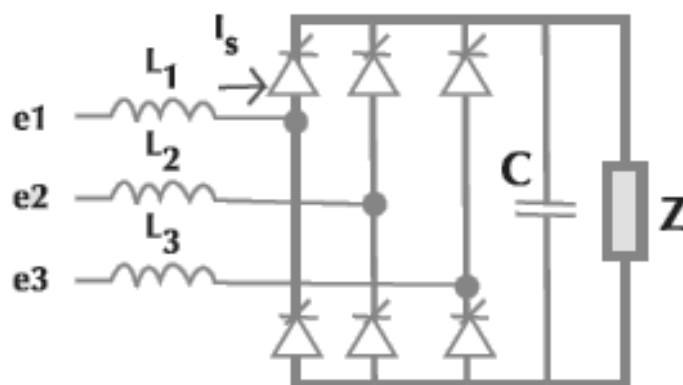
Conforme Ndiaye (2006) sendo a finalidade da modelagem de cargas não lineares, a reprodução da corrente drenada pelo equipamento produtor de distorção harmônica, seria normal pensar em uma abordagem onde fosse modelado o circuito elétrico de tais equipamentos. Porém, apesar dessa estratégia ser muito precisa em seus resultados, ela também se torna muito complexa, em simulações digitais. Sendo também muitas vezes difícil a obtenção dos circuitos correspondentes dos equipamentos, com os dados reais.

A seguir serão destacados os principais dispositivos geradores de harmônicas, que estão presentes na planta termoeletrica do estudo de caso, demonstrando sua representação convencional, verificando-se, assim, a complexidade dos circuitos de cada equipamento.

- Conversores/Retificadores/Inversores

Os conversores estão presentes nos sistemas elétricos com a finalidade de converter tensão e/ou corrente alternada (CA) em tensão e/ou corrente contínua (CC).

A Figura 11, Moreno (2001), mostra a representação de um retificador trifásico de 6 pulsos. Normalmente esses dispositivos são compostos de uma Ponte de Graetz que utiliza diodos (não controlados), diodos e tiristores (semicontrolados) ou tiristores (totalmente controlados).



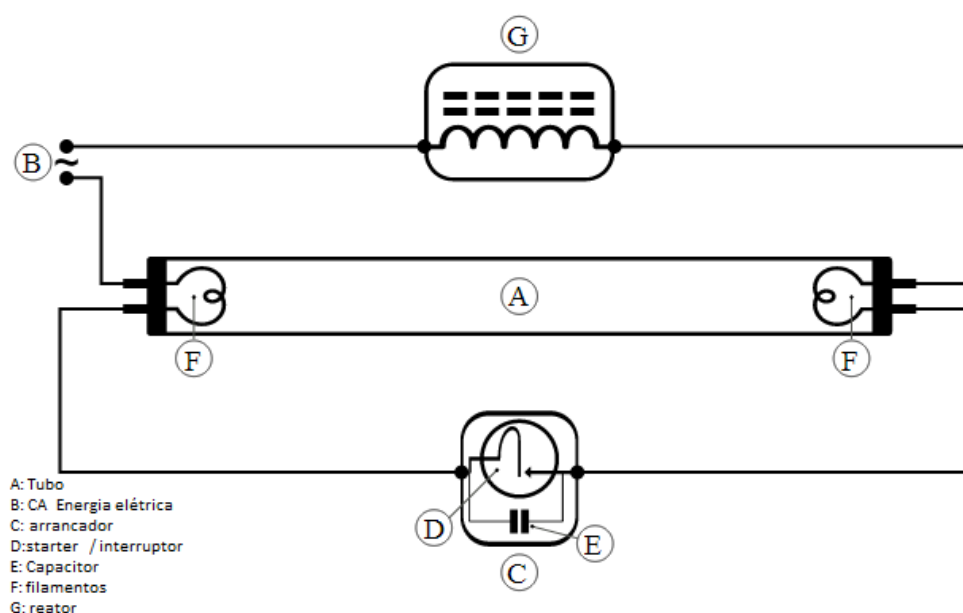
**Figura 11 Retificador trifásico**

- Lâmpadas Fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes são um tipo de lâmpada de descarga. O princípio de funcionamento das lâmpadas fluorescentes baseia-se em descargas a gás, elas emitem luz pela passagem da corrente elétrica através de um gás, provocando uma descarga que é

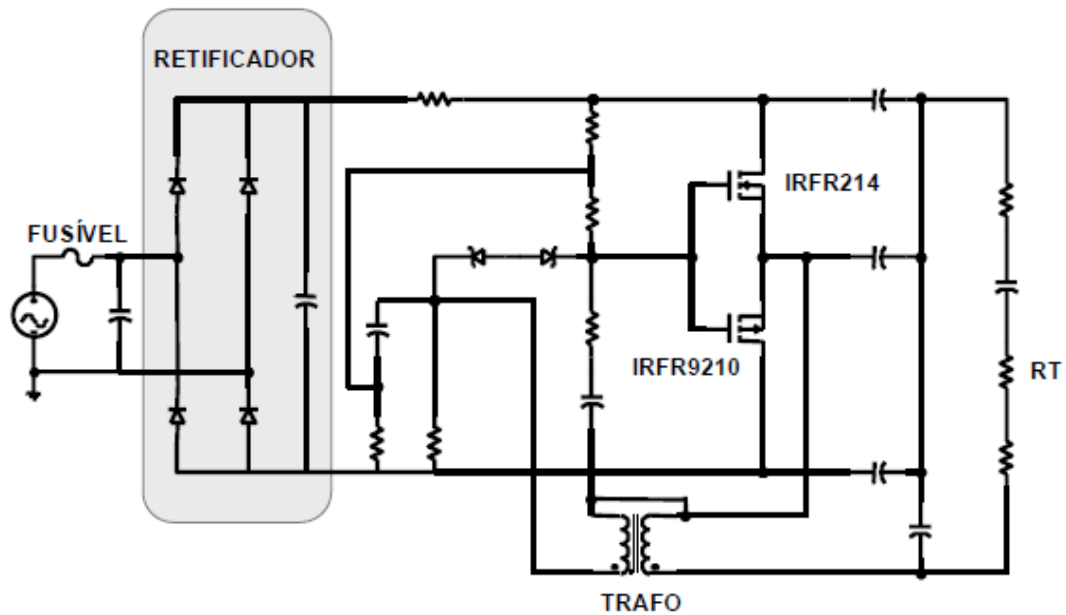
quase que totalmente formada por radiação ultravioleta (invisível ao olho humano). As lâmpadas fluorescentes têm alta eficiência e longa durabilidade, porém causam grandes problemas de distorção harmônica na rede elétrica, quando em grande quantidade.

Esse tipo de lâmpada necessita de um reator para que ela funcione corretamente. O dispositivo tem as funções de fornecer nível de tensão adequado para ignição e, limitar a corrente durante a operação em regime. A Figura 12 mostra uma lâmpada fluorescente e seu reator é visualizado no esquema pela letra G.



**Figura 12 Circuito de uma lâmpada fluorescente**

As lâmpadas fluorescentes compactas são grandes geradoras de distorções harmônicas para o sistema elétrico, em Ndiaye (2006) é apresentado o circuito eletrônico de uma lâmpada de baixo fator de potência disponível no mercado, o modelo é mostrado na Figura 13.



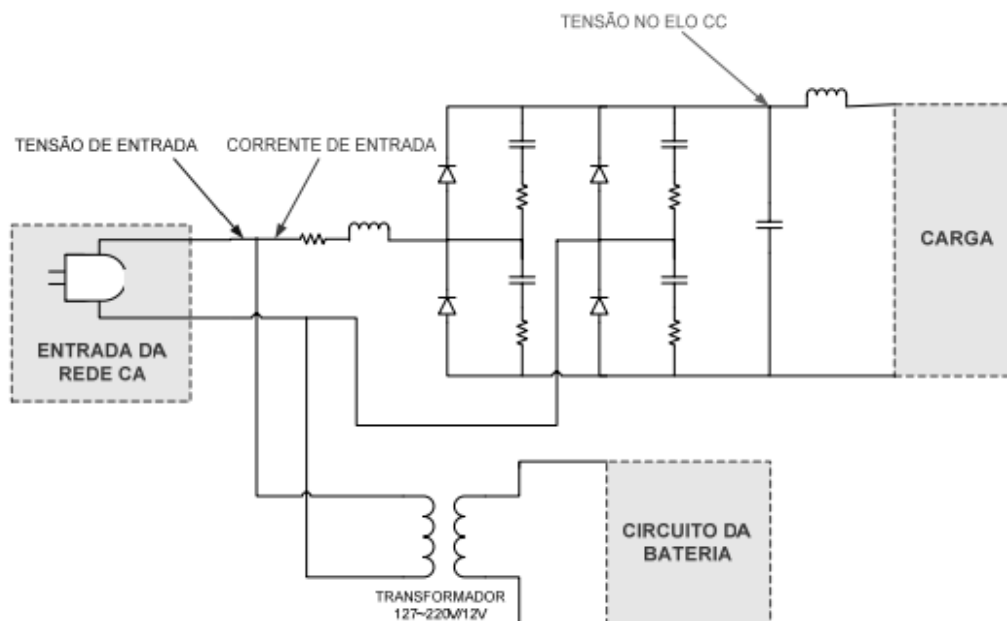
**Figura 13 Circuito de uma lâmpada fluorescente compacta**

O circuito tem uma ponte completa de diodos na entrada e no lado CC um capacitor de filtro que está conectado aos terminais da ponte, parte hachurada da Figura 13. O circuito é formado por cerca de trinta componentes, entre resistores, capacitores, diodos e chaves semicondutoras ativas.

- *UPS*

Os *UPS*, também chamados de no-breaks ou sistemas ininterruptos de energia, frequentemente estão presentes no sistema elétrico pertencentes a clientes comerciais ou industriais. Devido a falhas que ocorrem na rede elétrica, este dispositivo se torna essencial para manter o funcionamento dos equipamentos que se fazem necessários nestes casos.

Em Gondim *et al* (2008) um *UPS* é modelado para realização dos estudos através de um modelo existente comercialmente, do tipo *Line Interactive*, e pode ser observado na Figura 14.

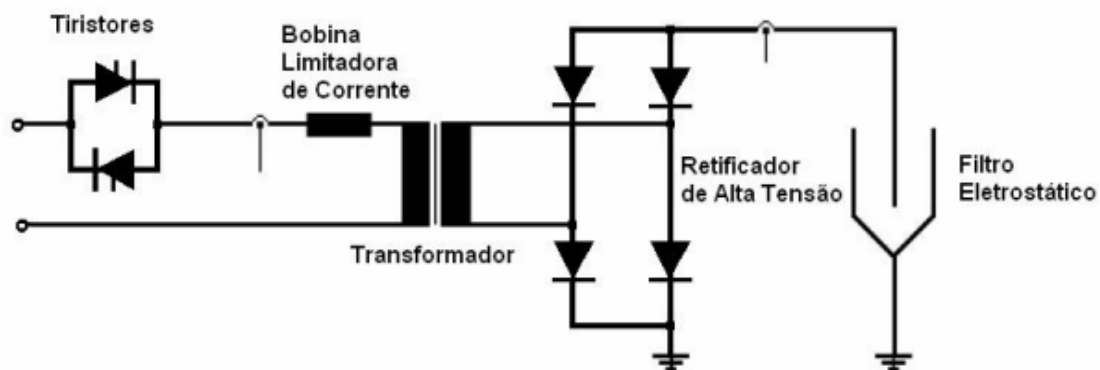


**Figura 14 Circuito de UPS**

- Precipitador Eletrostático

Os precipitadores, ou filtros de ar, eletrostáticos são equipamentos com funcionamento baseado nas interações eletrostáticas das cargas. Compostos por placas carregadas com sinais contrários uma à outra, ou seja, uma carregada positivamente e outra negativamente, o precipitador filtra as partículas que passam entre as placas, através da interferência que a primeira placa causa nas partículas, eletrizando-as, e na consequência que a outra placa acarreta, junto a um campo elétrico existente entre elas, ocasionando a acumulação das partículas entre ambas.

A Figura 15 mostra um esquema de um precipitador eletrostático.



**Figura 15 Precipitador eletrostático**

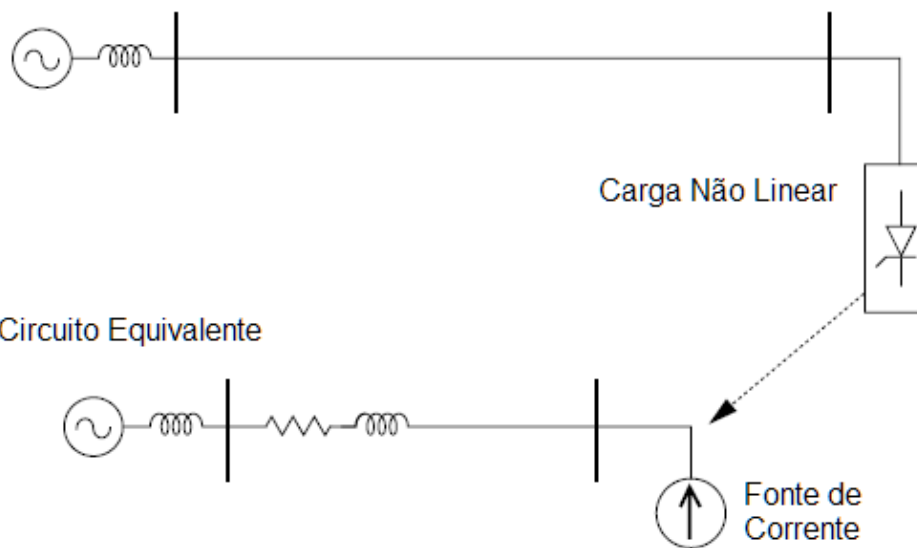
Pelo exposto acima, sobre a representação dos dispositivos eletrônicos de potência, conclui-se que é bastante trabalhosa a modelagem para se chegar o mais próximo possível da realidade de um componente desse tipo. Tendo em vista que a finalidade da modelagem desses componentes é basicamente demonstrar o comportamento das correntes drenadas por eles, pode-se usar um artifício para representar esses tipos de equipamentos.

Devido à complexidade, a modelagem é feita conforme sugerido em Dugan *et al* (2002), onde a representação de cargas não-lineares pode ser feita através de técnicas de solução de circuitos lineares, usando-se, para tanto, a injeção de fontes de corrente ou de tensão.

Esse tipo de modelagem é fortemente recomendado e amplamente utilizado na área de análise de distorções harmônicas. O resultado com tal modelagem é confiável, visto que as fontes recebem valores reais de medição. Ainda segundo o autor, na maioria dos estudos sobre distorções harmônicas, a modelagem é feita com fontes de corrente, como observado na Figura 16, de Dugan *et al* (2002), onde um conversor de potência foi representado com uma fonte de corrente.



Diagrama Unifilar



**Figura 16 Representação de uma carga não linear através de fonte de corrente**

É necessário lembrar e deixar claro que esta estratégia pode ser empregada quando são disponibilizadas informações precisas, como medições, a respeito do conteúdo harmônico da corrente drenada por determinada carga, no caso desse estudo, as medições da magnitude e ordem das harmônicas principais desses equipamentos.

### 3.3 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO

Existem dois métodos principais de simulação para fontes harmônicas, a simulação no domínio do tempo e a simulação no domínio da frequência.

#### 3.3.1 Domínio do Tempo

Segundo Arrillaga *et al* (1997), a simulação no domínio do tempo consiste em equações diferenciais que representam o comportamento dinâmico dos componentes de sistema elétrico. Conforme Ndiaye (2006), essas simulações são conseguidas através da integração numérica de uma série de equações algébrico-diferenciais lineares e não-

lineares, que descrevem o sistema. Arrillaga *et al* (1997) diz que o sistema de equações resultante, geralmente é não linear.

Ainda conforme Arrillaga *et al* (1997), os dois métodos mais utilizados na simulação no domínio do tempo são a variável de estado e a análise nodal. A solução de variável de estado foi aplicada pela primeira vez aos sistemas de energia CA-CC, e é amplamente utilizada em circuitos eletrônicos. Por sua vez, a abordagem nodal é considerada por Arrillaga *et al* (1997) mais eficiente, e tornou-se popular na simulação de transitórios eletromagnéticos no comportamento do sistema de potência; ela é utilizada com equivalentes de Norton para representar os componentes dinâmicos.

Em Schwanz (2013) são descritos brevemente os métodos de análise nodal e de variáveis de estado; o primeiro consiste na obtenção de um sistema de equações diferenciais através das tensões dos nós do circuito em relação a um nó de referência. Esse sistema de equações são representativas do comportamento dinâmico do sistema. No segundo, é feita a estimação dos estados das distorções harmônicas e assim determinados os níveis de distorção nas variáveis de estado, a partir de suas medições.

Conforme Das (2012), o modelo mais simples de harmônica é uma fonte harmônica rígida e a impedância do sistema linear. Uma fonte harmônica rígida produz harmônicas de uma determinada ordem, e sua magnitude e fase são constantes. Múltiplas fontes harmônicas são assumidas para atuar isoladamente, e o princípio da superposição se aplica. Estes modelos podem ser resolvidos por técnicas iterativas e a precisão obtida será idêntica à dos métodos de domínio de tempo.

Também em Das (2012) é considerado que, no sistema elétrico, os elementos não lineares e variáveis no tempo podem alterar significativamente a interação dos harmônicos com o sistema de potência, conforme o seguinte:

- A maioria dos dispositivos não lineares que produzem harmônicos não característicos como condições terminais são, na prática, não ideais, por exemplo, conversores operando com tensões desequilibradas.
- Há uma interação entre quantidades de CA e CC, e há interações entre os harmônicos de ordem diferente, dadas por funções de comutação.
- A porta de controle dos conversores pode interagir com harmônicos através de loops de sincronização.

Análises no domínio do tempo têm sido utilizadas para estudos de estabilidade transitória, energização de linhas de transmissão, e transitórios de comutação. É possível resolver uma ampla faixa de equações diferenciais para o sistema de potência através da simulação computacional e para construir um modelo para os cálculos de harmônicas, que poderia evitar muitas aproximações inerentes à abordagem no domínio da frequência (Das, 2012).

Arrillaga *et al* (1997) comenta sobre a derivação de informações harmônicas através de programas no domínio do tempo, envolvendo a solução para o estado estacionário e, em seguida, aplicação da FTT, Transformada Rápida de Fourier, através de processamento computacional. E Das (2012) também faz menção à praticidade de calcular diretamente as distorções harmônicas e fazer FFT, podendo, então, convertê-las em domínio de frequência.

Para Das (2012), na análise no domínio do tempo, uma parte do sistema de interesse pode ser modelada em detalhe; este modelo detalhado consiste em modelos trifásicos dos componentes do sistema (transformadores, fontes de harmônicas e linhas de transmissão), e isso pode ser acoplado a um modelo de rede de ramos RLC concentrados nas barras de interligação para representar o ponto de acionamento e impedâncias das

barras de transferência selecionadas. O sistema global a ser estudado é consideravelmente reduzido em tamanho, e a simulação de domínio de tempo é simplificada.

Tanto Arrillaga *et al* (1997) como Das (2012) citam o uso do programa padrão de transitórios eletromagnéticos, o EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Das (2012) sugere para simulação no domínio do tempo e Arrillaga *et al* (1997), para verificação de algoritmos no domínio da frequência.

### **3.3.2 Domínio da Frequência**

Conforme Dias (2002), os métodos no domínio da frequência podem ser divididos em: métodos lineares ou métodos não lineares (iterativos). O método linear é conhecido como método de injeção de correntes; ele é muito utilizado, tanto por causa de sua simplicidade, como por estar mais disseminado no setor industrial e nas concessionárias de energia elétrica. Os métodos não lineares são baseados na abordagem da carga não-linear junto com o modelo linear do sistema elétrico, através de um processo iterativo que se repete até a convergência; este método também possibilita a realização do fluxo de potência harmônico.

Para Arrillaga *et al* (1997), o modelo mais simples usado para domínio da frequência envolve uma análise monofásica, considerando que o fornecimento de tensão fundamental trifásica nos pontos de acoplamento comum está dentro do limite equilibrado. Nestas condições os estudos de fluxo de carga são normalmente realizados supondo uma perfeita simetria de componentes de rede em diagramas unifilares. A mesma suposição é muitas vezes feita para as frequências harmônicas, mesmo que não haja nenhuma garantia de simetria harmônica especificada pelas concessionárias.

Segundo Schwanz (2013), os componentes harmônicos da tensão e corrente são utilizados para a análise no domínio da frequência diretamente no regime permanente, e a solução é dada em cada uma das frequências analisadas no sistema.

Muitas vezes a simulação do efeito das harmônicas no sistema de potência é feita através de um equivalente de impedâncias, que é representado com uma fonte única de harmônica e fornece uma solução direta (Arrillaga *et al*, 1997). Para Das (2012), os cálculos no domínio da frequência são dados pela apuração do espectro harmônico da carga, e a injeção de corrente é representada por um circuito equivalente de Norton. O fluxo de corrente harmônica é calculado ao longo do sistema para cada um dos harmônicos.

Conforme Ndiaye (2006), tenta-se reproduzir a corrente drenada pelo equipamento em condições nominais de operação, quando se modela uma carga não linear (geradora de harmônica) como uma fonte de corrente. Ainda, segundo o autor, a representação de fontes de correntes harmônicas pode ser através de fontes de correntes harmônicas equivalentes, necessitando-se, para isso, dados do conteúdo harmônico da corrente drenada, ou seja, a magnitude e fase dos harmônicos principais.

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 COMPLEXO TERMOELÉTRICO JORGE LACERDA

A Usina Termoeétrica Jorge Lacerda (UTE Jorge Lacerda) é, atualmente, uma usina da empresa Tractebel Energia. A empresa Tractebel Energia acumula uma capacidade instalada de 8.685 MW. Essa capacidade é obtida através de geração hidráulica, geração a biomassa, geração eólica e geração termoeétrica, da qual faz parte a usina de interesse do projeto, UTE Jorge Lacerda (Tractebel Energia, 2013a).

O nome da usina é em homenagem ao ex-governador de Santa Catarina, Jorge Lacerda, que a criou em 1957, chamando-a de SOTELCA (Sociedade Termoeétrica de Capivari). Ela iniciou suas atividades com 100 MW de potência, e em 1971 foi incorporada pela Eletrobrás, através da Eletrosul, nesta época com 440 MW de potência. E em 1998 a Tractebel Energia, do grupo Suez, assumiu a administração do Complexo Termoeétrico Jorge Lacerda (SIECESC, 2008).

A UTE Jorge Lacerda, também chamada de Complexo Termoeétrico Jorge Lacerda, tem hoje a capacidade instalada de 857 MW, é composta pelas usinas Jorge Lacerda A (UTLA), Jorge Lacerda B (UTLB) e Jorge Lacerda C (UTLC), e está localizada na cidade de Capivari de Baixo, no sul do estado de Santa Catarina.

A UTLA é o foco do projeto. Ela é composta por 4 unidades, denominadas: Unidade 1, Unidade 2, Unidade 3 e Unidade 4. Enquanto a UTLB é formada pelas Unidades 5 e 6. E a UTLC é composta pela Unidade 7.

A Unidade 1 da UTLA iniciou suas atividades em Março de 1965; após dois anos, a Unidade 2 também começou a operar. Ela entrou em funcionamento em Fevereiro de 1967, e ambas operam com potência de 50 MW atualmente. As unidades 3 e 4 entraram em atividade na década de 70, com a ampliação da Usina. A Unidade 3 a partir de Fevereiro de

1974 e a Unidade 4 em Junho de 1973, e elas operam com 66 MW de potência atualmente (Tractebel Energia, 2013b).

As Unidades 3 e 4, de 66 MW, são espelhadas - para segurança da geração da Usina, e pelo fato de trabalharem uma apoiando a outra em caso de necessidade especial - e as características delas são idênticas.

O estudo deste projeto é ainda mais focado, dentro da UTLA, sendo a Unidade 3 a principal meta de estudo do projeto. Os dados utilizados são detalhados através do diagrama unifilar e relatórios que compõem informações das unidades 3 e 4, por elas serem interligadas e estarem presentes na mesma planta.

#### **4.1.1 Funcionamento e Características da UTLA**

O funcionamento de uma Usina Termoelétrica é dado a partir da queima de um combustível; no caso da UTLA, o Carvão Mineral. A Energia Elétrica é gerada através da Energia Térmica provinda da combustão produzida pela queima do combustível fóssil.

O Carvão mineral provém da decomposição, durante centenas e centenas de anos, de matéria orgânica de florestas e matas. O carvão mineral tem a seguinte composição: Carbono, Oxigênio, Nitrogênio, Enxofre e outros elementos rochosos e minerais.

Para uma usina termoelétrica a carvão mineral, o passo inicial é a extração do insumo básico e armazenagem do mesmo. O carvão mineral é retirado de minas, localizadas normalmente próximas à usina, então ele é transportado (muitas vezes por ferrovias) e alocado adequadamente para ser tratado.

A Usina Jorge Lacerda utiliza carvão das jazidas localizadas no sul de Santa Catarina, o tipo do carvão é o CE 4500. Seu transporte é por meio dos trilhos da Ferrovia

Tereza Cristina (FTC) que interliga as minas carboníferas até a Usina Termoeétrica (SIECESC, 2008).

A Tractebel Energia recebeu carvão CE 4500 das carboníferas Gabriella Mineração Ltda, Mineração Santa Augusta, Carbonífera Catarinense Ltda, entre outras, na década passada. Em 2007 mais de 90% da produção das carboníferas da região Sul do estado de Santa Catarina foi destinado à geração de energia elétrica do Complexo termoeétrico Jorge Lacerda (SIECESC, 2008).

Após sua chegada e armazenagem na usina, o carvão passa por processos físicos como britagem, moagem ou pulverização. No caso da UTLA, o carvão em estado bruto é moído e seco. Então, com a dimensão ideal para seguir o processo de produção da usina, o carvão mineral, vai para a caldeira. A caldeira da Unidade 3 da UTLA é do tipo duplo passe, aquotubular e com circulação natural; o fabricante é ANSALDO. Na câmara de combustão, o carvão é queimado gerando energia térmica (calor). Esse calor aquece a água circulante em tubos na caldeira e a transforma em vapor.

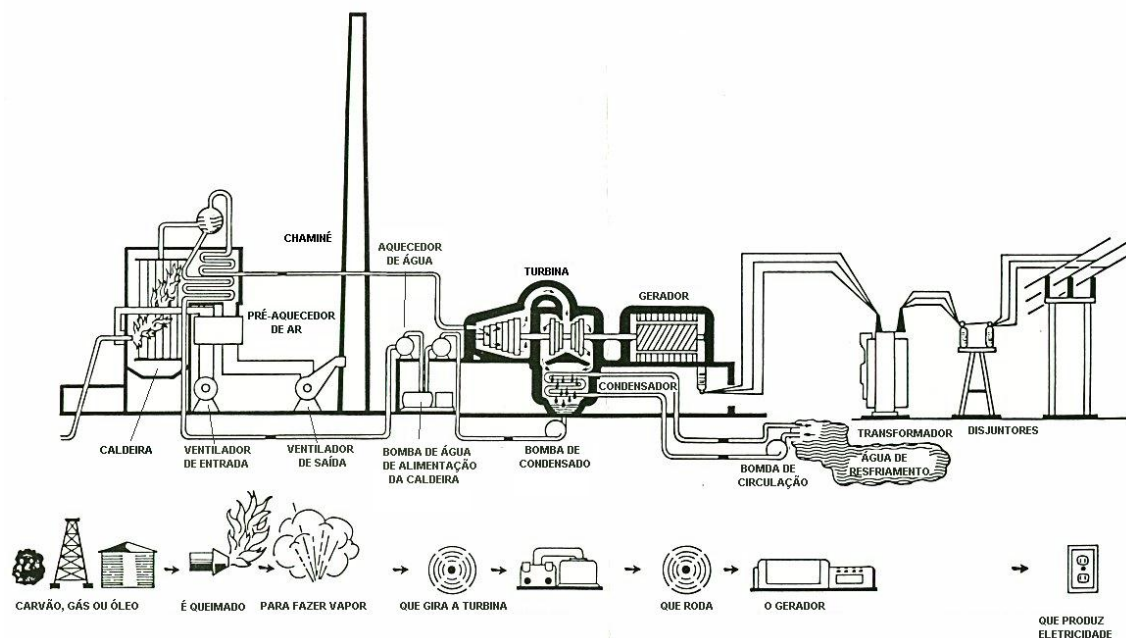
A capacidade de produção de vapor da caldeira da Unidade 3 é de 230.000 kg/h, com pressão do vapor superaquecido de 147 kgf/cm<sup>2</sup>, e temperatura do vapor superaquecido de 540 °C (Tractebel Energia, 2013b).

Essa alta pressão do vapor faz com que ele gire a turbina da usina, que aciona o gerador, ocorrendo a transformação de energia mecânica da turbina em energia elétrica. A Unidade 3 conta com uma turbina com pressão do vapor superaquecido de 140 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de 538 °C; é uma turbina fabricada por ANSALDO (Tractebel Energia, 2013a).

Finalmente o vapor é condensado, volta para a caldeira em forma líquida e recomeça o ciclo. O tipo de sistema água de circulação é ciclo aberto.



O processo de geração de energia elétrica que foi descrito pode ser observado na Figura 17, de Alterima Geradores, que mostra como funciona uma usina termoeletrica.



**Figura 17 Sistema de uma Usina Termoeletrica.**

A utilização de carvão mineral gera, como consequência, resíduos. Entre esses resíduos estão as cinzas, que no caso do tipo do carvão brasileiro tem usualmente proporção 2 para 1. Isto é, cada 200 toneladas de carvão gera 100 toneladas de cinzas. As cinzas podem ser pesadas ou leves; as pesadas são retidas dentro das caldeiras, enquanto as leves podem ser emitidas para o ambiente. Para evitar ou reduzir essa emissão, são usados os precipitadores eletrostáticos (entre outros equipamentos, como filtros). Na Unidade 3 é utilizado um Precipitador Eletrostático com 98% de eficiência, fabricado por ANSALDO, com tecnologia Joy Westerner (Tractebel Energia, 2013b).

#### 4.1.2 Serviços Auxiliares

Uma usina termoeletrica tem a função de gerar energia elétrica para os consumidores, mas para que ela se mantenha em funcionamento, cumprindo seu papel de

usina geradora de energia, são necessários vários serviços paralelos e auxiliares a ela, que servem de suporte para que a usina permaneça em operação, eles são chamados de serviços auxiliares.

Os serviços auxiliares são o conjunto de equipamentos fundamentais para o bom funcionamento da usina. Alguns dos principais são: motores, transformadores, conversores, inversores, painéis de distribuição, sistema de água, sistema de ar, aquecimento, ventilação, iluminação e aterramento. A configuração do sistema elétrico, localização dos principais elementos e algumas especificações costumam ser encontradas no diagrama unifilar da usina.

O diagrama unifilar de uma indústria ou concessionária serve para representar de forma monofásica como estão distribuídos os componentes do sistema elétrico que estão presentes nela. A Figura 18 mostra o diagrama unifilar resumido da unidade 3 da UTLA do complexo Jorge Lacerda. No ANEXO A, deste documento, é apresentado o diagrama inteiro, incluindo a unidade 4, para melhor visualização.

Este diagrama é o foco do estudo de caso, o que se observa neste diagrama é o que deve ser modelado e simulado para análise das distorções harmônicas. Constam nele o gerador, transformadores, circuitos, precipitador, UPS, retificador, motores e cargas. Existe um conjunto de grandes motores conectados em 6,3 kV que não estão neste diagrama mas que fazem parte do sistema a ser analisado, e serão comentados mais adiante.



**Tabela 13: Características das cargas principais dos Serviços Auxiliares da Unidade 3**

Tipos de Carga	Potência	Tensão	Corrente Nominal	Número de Polos	Rotação	Fator de Deslocamento	Rendimento
Motor bomba alimentação (2 motores – A e B)	1800 kW	6300 ± 10%	191,5 A	2	3580 RPM	0,9	95,8%
Motor bomba circulação (2 motores – A e B)	235 kW	6300 ± 10%	30 A	10	712 RPM	0,79	91%
Motor moinho carvão (4 motores – A, B, C e D)	150 kW	6300 ± 10%	22 A	12	590 RPM	0,79	90%
Motor bomba condensador (2 motores – A e B)	162 kW	6300 ± 10%	19 A	4	1770 RPM	0,86	92%
Motor ventilador induzido (2 motores – A e B)	250 kW	6300 ± 10%	30 A	6	1180 RPM	0,83	92%
Motor ventilador forçado (2 motores – A e B)	280 kW	6300 ± 10%	31,5 A	4	1770 RPM	0,88	93%
Motor ventilador recirculação gases (2 motores - A e B)	220 kW	6300 ± 10%	27 A	8	885 RPM	0,82	92%
Motor ventilador ar primário (4 motores - A, B, C e D)	165 kW	6300 ± 10%	18,7 A	4	1770 RPM	0,88	92%
Motor compressor ar comando (2 motores – A e B)	55 kW	440 V	93 A	2	3560 RPM	0,88	92%
Motor bomba água mancais (2 motores – A e B)	44 kW	440 V	76 A	2	3525 RPM	0,90	95%

\* Dados disponibilizados pela Tractebel Energia.

No caso da Unidade 3, da UTLA, do Complexo Jorge Lacerda, os serviços auxiliares mais relevantes são motores que trabalham na manipulação de insumos, e correspondem a 80% do consumo total das cargas de serviços auxiliares, são eles:

- Moinhos de Carvão;
- Bombas de Alimentação;
- Ventiladores Forçados;
- Ventiladores Induzidos;

Os motores dos moinhos de carvão são essenciais para a etapa de beneficiamento do carvão. Esses motores fazem o acionamento dos moinhos de carvão, que são quatro; eles fazem parte da primeira etapa do processo na usina termoeletrica, onde é feita a moagem para melhor eficiência e resultado durante a queima. Os motores das bombas de alimentação são os que têm maior potência entre os motores dos serviços auxiliares. Eles acionam as bombas de alimentação, que são duas, A e B, e por meio delas é feito o fornecimento para a caldeira. Os motores dos ventiladores forçados e os motores dos ventiladores induzidos também são importantes no processo, pois acionam, respectivamente, o ventilador forçado, que controla a temperatura da combustão interna da caldeira, forçando ar externo para dentro da caldeira, e o ventilador induzido, que controla a pressão e a temperatura dentro da caldeira, retirando ar de dentro para fora.

O tempo de arranque dos motores é uma informação importante no estudo, pois nesse período existem muitos tipos de transitórios ocorridos por causa da partida do motor, portanto, deve-se desconsiderar o primeiro momento de simulação. A Tabela 14 mostra o tempo de arranque de cada tipo de motor conectado na barra de 6300 V.

**Tabela 14: Tempo de arranque dos motores da barra 6,3 kV**

Motor	Tempo de arranque
Bomba de Alimentação	10 s
Bomba Circulação	1 s
Moinho Carvão	10 s
Bomba de Condensação	10 s
Ventilador Induzido	25 s
Ventilador Forçado	12 s
Ventilador Recirculação Gases	37 s
Ventilador Ar Primário	32 s

\* Dados disponibilizados pela Tractebel Energia.

## 4.2 METODOLOGIA PROPOSTA

A necessidade de modelagem e simulação nesse estudo de caso é uma forma auxiliar de análise do comportamento da Unidade 3, e verificação dos potenciais causadores de distorções harmônicas na planta geradora.

Para tanto, o estudo apresentado é uma pesquisa de natureza aplicada, de perfil quantitativo, que utiliza os métodos de modelagem e simulação para um estudo de caso. A pesquisa é aplicada por ter em vista a solução de um problema existente na prática; é quantitativa por utilizar dados numéricos para classificação e análise; e seu método é através de experimentação num modelo elaborado de acordo com um sistema real, para verificação das respostas às modificações propostas.

Para fazer a modelagem e a simulação do estudo de caso foi escolhido um programa mundialmente utilizado na área de sistemas de potência, o *Alternative Transient Program* (ATP). Este software é uma versão do *Electromagnetic Transients Program* (EMTP); ele é utilizado para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos,

e sua formulação matemática baseia-se na regra de integração trapezoidal, solucionando conjuntos de equações diferenciais dos componentes do sistema, no domínio do tempo.

Os componentes do sistema foram modelados conforme recomendação da bibliografia utilizada e citada neste documento. Entre as variadas opções de modelos disponíveis no ATP Draw, foi escolhido, portanto, o mais próximo e/ou mais utilizado nesta área de pesquisa – QEE, com enfoque em distorções harmônicas – para cada um dos componentes.

Após a modelagem dos componentes no programa, ele é rodado (*run ATP*) e em pontos pré-determinados é feita a leitura das tensões ou correntes, dadas em forma de onda, e então é feita a FFT, que resulta no espectro harmônico do sinal, que é comparado com as distorções harmônicas medidas *in loco* com equipamento analisador de qualidade.

#### **4.2.1 Ferramenta de Simulação – ATP DRAW**

O *Alternative Transient Program* (ATP) é um programa para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos que ocorrem nos sistemas elétricos, bem como fenômenos de natureza eletromecânica. Ele possui uma interface gráfica, chamada ATP Draw, que funciona como um pré-processador do ATP, pois é utilizado como um passo inicial para uma simulação no ATP. Através do ATP Draw o usuário constrói um circuito elétrico qualquer, baseando-se na visualização e seleção de modelos pré-definidos disponíveis na interface gráfica - ela contém os principais elementos componentes de uma rede elétrica. A versão do ATP Draw utilizada é a 5.7.

O ATP Draw é uma excelente ferramenta de trabalho para usuários que não tem total domínio de linguagem de programação, e é um software livre, portanto, disponível a qualquer usuário, seja estudante ou profissional da área. O programa é bastante intuitivo, uma vez que o usuário escolhe os componentes de forma rápida e objetiva, seguindo a

filosofia “o que você vê é o que você tem” os componentes são inseridos no circuito, através de opções do menu de seleção. Após a seleção, é necessário que se forneça os valores dos parâmetros para configuração do modelo que será simulado. Essa característica do programa traz outra grande vantagem da sua utilização, uma vez que com a visualização, diminui-se a chance de erros de montagem do sistema, ao contrário do que ocorre quando há necessidade de programação.

O ATP, diferentemente do EMTP, que deve ter licença paga, não possui um suporte técnico disponível, em contrapartida ele é gratuito, e existem diversos fóruns e grupos de usuários que podem ser encontrados na internet, com relatos de experiências ou problemas comuns, com soluções e auxílio dos usuários.

#### ***4.2.1.1 Configurações a serem utilizadas no ATP Draw***

As configurações utilizadas no ATP Draw para a simulação do sistema de estudo foram as seguintes:

- $\Delta T$  (passo de integração – em segundos): 0,0001
- $T_{\text{máx}}$  (Tempo máximo – em segundos): 50 s
- $X_{\text{opt}}$  (As indutâncias são dadas em mH, se for colocado 0): 0
- $C_{\text{opt}}$  (As capacitâncias são dadas em  $\mu\text{F}$ , se for colocado 0): 0

#### **4.2.2 Modelagem do Sistema**

Nesta seção será explicado como foi modelado cada um dos componentes que fazem parte da Unidade 3 da usina termoeletrica, desde o modelo até os parâmetros de entrada solicitados pelo software ATP Draw.



#### 4.2.2.1 Circuitos Trifásicos

Em plantas industriais os circuitos de alimentação são considerados mais simples quando comparados aos sistemas de transmissão. Existem alguns modelos que podem ser considerados neste tipo de simulação. Os circuitos são modelados por uma impedância série com parâmetros R, L concentrados, ou seja, por um circuito RL série, em virtude do comprimento dos mesmos. Conforme já mencionado, todas as linhas e circuitos da parte de estudos na Usina A, do Complexo Jorge Lacerda, têm comprimentos considerados curtos, menores que 1 km.

A representação deles foi feita através do modelo RLC3 do ATP Draw, sendo inseridos os dados somente das resistências e indutâncias dos circuitos, desconsiderando-se as capacitâncias, conforme mostra a Figura 19.



**Figura 19 Modelo RLC3 do ATP Draw.**

Para a inserção desses valores de R e L, requeridos pelo modelo, a metodologia utilizada foi a seguinte:

1. Pelo diagrama unifilar da planta, foi verificado quais eram os valores de corrente que passavam em cada circuito trifásico a ser modelado;
2. Sabendo o valor da corrente em cada trecho, foi acrescido o valor de 10% para garantir uma margem de segurança na escolha da espessura dos condutores utilizados para cada circuito. Foram pesquisados os valores das bitolas dos condutores que suportam tais correntes, mediante tabelas de fabricantes de condutores;

3. Tendo os valores da secção e do diâmetro do condutor, dados pelas tabelas, utilizou-se como recurso uma simulação computacional no programa EMTP, que calcula R e L, através desses dados de entrada;
4. O programa EMTP calcula os parâmetros por quilômetro, então, conhecendo o comprimento de cada trecho, dado em km, multiplicou-se esse valor por R e L, e os resultados foram inseridos no ATP Draw, com o modelo da Figura 20.

A Tabela 15 mostra os dados necessários para a representação dos circuitos, com a metodologia utilizada.

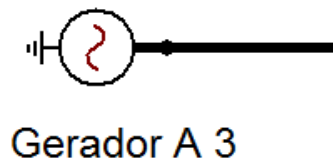
**Tabela 15: Dados do circuito**

R	Resistência série por unidade de longitude por fase ( $\Omega/\text{km}$ )
$X = \omega.L$	Reatância série por unidade de longitude por fase ( $\Omega/\text{km}$ )
L	Indutância série por fase (H/km)
l	Comprimento de linha (km)
i	Corrente na linha (A)

O Anexo B traz a tabela com os valores de corrente no trecho do circuito trifásico e respectivos R e L calculados para incluir no modelo do ATP Draw.

#### **4.2.2.2 Gerador**

O gerador da Unidade 3 da usina termoeletrica A (UTLA), denominado A3, foi implementado no ATP Draw como uma fonte ideal de tensão (*AC Source*) em série com a reatância, conforme recomendado. Sendo que, segundo Sousa (2011) simplifica-se o modelo de gerador desconsiderando as resistências e reatâncias do circuito, exceto a reatância síncrona. A fonte tipo *AC Source* tem seu ícone apresentado na Figura 20.



**Figura 20 Gerador A3 no ATP Draw**

Os parâmetros requisitados para este modelo no ATP Draw para o gerador A3 são mostrados na Tabela 16.

**Tabela 16: Parâmetros do A3 - modelo AC Source**

Parâmetro de entrada solicitado	Dado disponibilizado
Tensão (V)	20500
Frequência (Hz)	60
Ângulo (°)	75.5
Numero de fases	3
Aterrado	sim
T início (s)	-1
T fim (s)	100

Para que o gerador entregasse uma tensão de 13800 V na barra, conforme o diagrama unifilar, foi ajustada a potência de entrada e o ângulo no ATP Draw. Assim, o gerador tem a potência de 75 MVA e gera 13800 V para o sistema.

E para inserir a reatância, foi inserida uma indutância na linha, em série com o gerador, pois o ATP Draw utiliza L como parâmetros de entrada, em mH. O valor da reatância do gerador que foi utilizada foi a reatância informada,  $X_s = 1,8$  pu, que quando convertida para indutância e valor base o resultado encontrado é 12,12 mH.

O ponto de interligação com o SIN também foi simulado com um gerador e uma reatância, neste caso, a reatância da linha. Os dados de entrada para o SIN são dados na Tabela 17. E a reatância da linha, dada pela indutância é  $L = 28$  mH.

**Tabela 17: Parâmetros do gerador que representa o SIN - modelo AC Source**

Parâmetro de entrada solicitado	Dado disponibilizado
Tensão (V)	230000
Frequência (Hz)	60
Ângulo (°)	0
Numero de fases	3
Aterrado	sim
T início (s)	-1
T fim (s)	100

O tempo de início, *StartA* no ATP Draw, tem o valor de -1, pois, desta forma, quando a simulação for rodada, a fonte já estará em funcionamento, portanto, em regime permanente, sendo assim, impossível visualizar os transitórios de energização da fonte (Marinho *et al*, 2012).

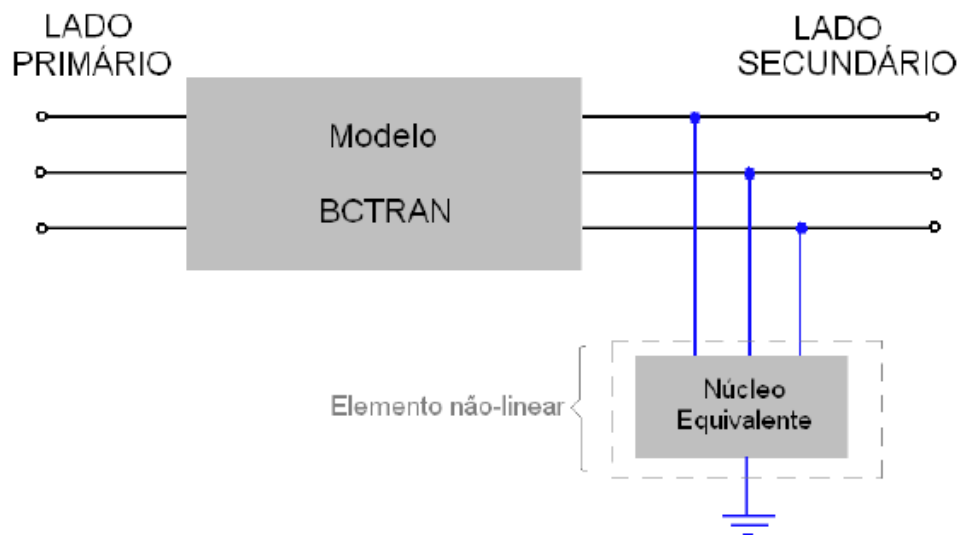
O tempo de fim, ou tempo de parada (*StopA* no ATP Draw), é 100, um tempo muito maior que o tempo máximo de simulação, com a finalidade de se ter a fonte funcionando durante toda a simulação, independente do tempo que se dará a simulação.

#### 4.2.2.3 Transformadores

Conforme Martinez-Velasco (2010) existem diferentes grupos de representações para transformadores, que dependem da modelagem utilizada. Para baixas e médias frequências, pode-se utilizar a determinação da matriz impedância ou da matriz

admitância. Para essa determinação normalmente são necessários os dados de ensaio a vazio e de curto circuito do transformador, para que sejam calculados os parâmetros elétricos, como impedância, resistência e reatância percentuais. Martinez-Velasco (2010) afirma que a rotina existente no modelo *BCTRAN* calcula os elementos da matriz através dos dados de ensaio do transformador, que são inseridos no ATP Draw por meio de uma janela de entrada de dados.

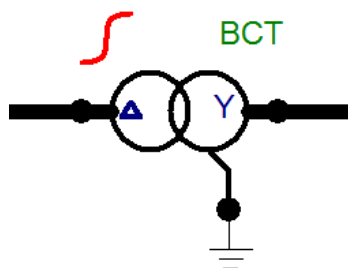
Segundo Oliveira (2009) o grupo que utiliza representação por matrizes inclui o modelo *BCTRAN*, que é um modelo linear, e, para muitos casos, deve ser incluído o efeito de saturação e histerese na modelagem. Uma alternativa é adicionar a excitação externamente, na forma de um elemento não linear. A Figura 21, Oliveira (2009), é a representação da modelagem do *BCTRAN* com núcleo magnético inserido externamente, representando o elemento não linear.



**Figura 21 Representação de transformador com modelo BCTRAN.**

Os transformadores existentes na Unidade 3 são cinco, e eles são denominados, conforme o diagrama unifilar: MT3, TU-3, AT3 (B3.MC771), TRAFÓ DO PRECIPITADOR (B3.MC32500) e T1 (TRAFÓ DO RETIFICADOR A).

Eles foram inseridos no programa ATP Draw com o modelo *BCTRAN*, que tem seu ícone mostrado na Figura 22.



**Figura 22 Transformadores no ATP Draw.**

Os parâmetros solicitados e dados inseridos para implementação deste modelo no ATP Draw são mostrados no Anexo C deste documento, e foram fornecidos através de documentos de ensaios dos transformadores. Para alguns transformadores os dados fornecidos estavam mais completos, para outros, no entanto, não havia todos os dados necessários, principalmente para os transformadores que eram mais antigos. Nesses casos, foram utilizados dados de transformadores com as características mais próximas às deles, como no caso dos trafos de 800 kVA e de 1000 kVA de potência. Ambos transformam as mesmas tensões, e somente um deles, o de 1 MVA, teve os dados de ensaio disponibilizados, portanto, para a inserção de dados no ATP Draw do outro, foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada referentes aos dados de ensaios do primeiro.

O transformador denominado T1 não teve seus dados de ensaio fornecidos também. Nesse caso, os dados utilizados para inserir no ATP Draw foram os dados de ensaio fornecidos pela empresa MVA Transformadores, que cordialmente enviou os ensaios de um transformador com potência de 50 kVA, próximo aos 50,7 kVA do T1.

#### 4.2.2.4 Cargas

##### Motores

Os motores presentes nos serviços auxiliares da Unidade 3 foram apresentados na Tabela 13; eles são motores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo.

Segundo De La Rosa (2006), um motor de indução pode desenvolver harmônicas por causa de pequenas assimetrias no estator da máquina, ou ranhuras do rotor ou irregularidades nos enrolamentos de uma máquina rotativa de enrolamento trifásico. No entanto, essas correntes harmônicas são geralmente menores do que as que ocorrem quando as máquinas são alimentadas através de inversores ou conversores de frequência.

Os motores de indução frequentemente são simulados no ATP Draw com o modelo UM\_3, como visto nos trabalhos de Ramos *et al* (1997), Gonçalves (2008), Guimarães (2008), Zappellini (2008), Baptista *et al* (2010) e Medeiros (2011). Este é o modelo mais utilizado quando se trata de estudos de distorções harmônicas. Para valores de entrada neste modelo são solicitados os dados do circuito equivalente do motor. Porém, foram disponibilizados somente os dados de placa de cada um dos motores considerados de principais cargas dos serviços auxiliares da usina, já vistos na Tabela 13. E então, era necessário encontrar os valores de circuito equivalente, ou seja, resistências do rotor e do estator, e indutâncias do rotor, do estator e de magnetização, além do escorregamento. Para esses dados serem calculados, são necessários os dados de ensaio em circuito aberto e curto-circuito dos motores, porém, essa é uma informação muito difícil de obter, e como esses motores são muito antigos, esta solicitação foi impossível de ser atendida.

Existem grandes dificuldades de cálculo dos circuitos equivalentes de motores, quando não há dados de ensaio. Várias são as pesquisas neste campo para obter tais parâmetros com mais facilidade. A maioria das pesquisas busca calcular o circuito

equivalente, através somente dos dados de placa do motor, que são informações que estão ao alcance de qualquer um, exceto se estiverem apagadas.

Um programa computacional gerado para tal função foi encontrado durante a pesquisa sobre cálculos de parâmetros do circuito equivalente. Ele é disponibilizado gratuitamente na internet, e foi elaborado exclusivamente com a finalidade de calcular os parâmetros solicitados pelo modelo UM\_3 do ATP Draw, através dos dados da placa do motor. Com este programa, tendo os dados de placa, e inserindo-os na janela de entrada de dados, é possível encontrar as variáveis requeridas pelo modelo UM\_3 no ATP Draw. O programa é denominado MOTDATPR, e foi desenvolvido por Ilkka Leikkonen. O MOTDATPR é um software com *layout* em inglês, ele foi encontrado num fórum americano de discussão de Sistemas Elétricos de Potência, e está localizado em um domínio finlandês (<http://pp.kpnet.fi/ijl/>). A Figura 23 mostra o *layout* do software.

The screenshot shows the 'Induction motor data (v.1.1.1)' software interface. It includes an 'INPUT' section with fields for frequency (50 Hz or 60 Hz), a 'Calculate' button, and a 'MVA -base- kV' field. Below this is a table of input parameters with their descriptions. An 'OUTPUT' section displays calculated values for various parameters. A circuit diagram shows the equivalent circuit with components like  $L_s - 1.5L_{sr}$ ,  $R_s$ ,  $R_r'$ ,  $L_r - 1.5L_{sr}$ , and a magnetization branch with  $1.5L_{sr}$  and  $0.176445H$ . Instructions at the bottom explain how to use these results in ATPDraw, listing values for LMUD, Ld, Rd, and R1.

INPUT	Description
6,3	nominal phase to phase voltage kV
1800	nominal active, useful power kW
0,00556	nominal slip, between 0.5 and 0.001
0,96	nominal electrical efficiency, between 0.5 and 1-slip
0,90	nominal power factor, between 0.5 and 0.999
5,00	locked rotor current / nominal current, larger than 1.5

OUTPUT	Value	Unit		
1.89966 pu	0.593813 pu	0.104744 pu	1.89966 pu	at 60 Hz
0.005039H	0.593813ohm	0.104744ohm	0.005039H	

Use the results in the following way for UM3 in ATPdraw:

0.176445 H	= LMUD = LMUQ of magnetization
0.005039 H	= Ld = Lq of stator, = L1 = L2 of rotor
0.593813 ohm	= Rd = Rq of stator
0.104744 ohm	= R1 = R2 of rotor

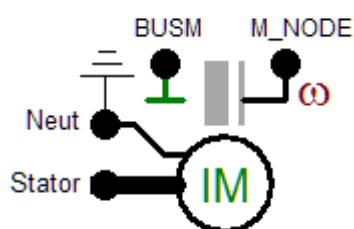
In addition, set Stator coupling = Y, Rotor coils: d = q = 1, Stator L0 = R0 = 0

Figura 23 Software MOTDATPR



O programa foi testado com exemplos onde se conhecia os valores de placa e valores do circuito equivalente, e a proximidade dos resultados validou o uso do programa para utilização nesta pesquisa. No Anexo D é explicado o funcionamento do MOTDATPR, e são mostradas as equações que o programa utiliza para fazer seus cálculos e encontrar os parâmetros do circuito equivalente.

O ícone do motor de indução, modelo UM\_3, no ATP Draw é apresentado na Figura 24.



**Figura 24 Modelo de máquina de indução do ATP Draw.**

Percebe-se que existem 4 nós de entrada no modelo. Um deles é trifásico, enquanto os outros três são monofásicos. Um dos nós monofásicos é aterrado e os outros representam a parte mecânica do motor. Para compor o modelo UM\_3 do ATP Draw foi inserido em cada nó o seguinte:

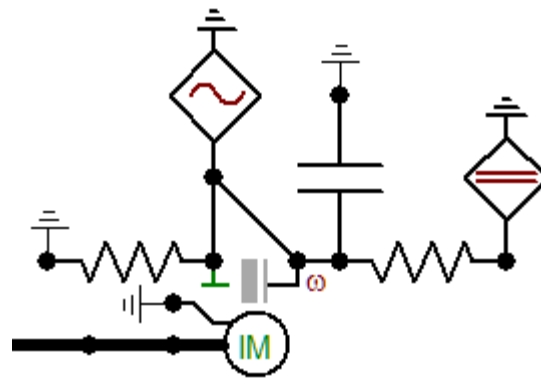
Stator - terminal de saída da armadura de 3 fases: esse nó foi ligado ao circuito trifásico do sistema;

M\_NODE - nó de torque do entreferro: foi inserida uma capacitância representando a inércia da máquina, uma resistência representando o coeficiente de atrito e uma fonte contínua de corrente representando o torque, pois segundo o manual de ajuda do próprio ATP Draw, o momento de inércia  $J$  dado em  $1 \text{ kg/m}^2$  é equivalente a uma capacitância de 1 Farad; o atrito do eixo dado em  $1 \text{ Nm/rad/s}$  é equivalente a uma condutância de  $1/\text{ohm}$ ; e o torque dado em  $1 \text{ Nm}$  é equivalente a uma corrente de  $1 \text{ A}$ .

BUSM - nó da fonte para inicialização automática: foi inserida uma fonte de corrente com valores de 0,001 Hz e  $-1 \times 10^{-5}$  A, que inicia em -1 segundo e para em 0 segundo da simulação;

Neut - ponto neutro: esse nó foi aterrado.

O modelo completo de um motor de indução, elaborado no ATP Draw para representar os motores dos serviços auxiliares da usina pode ser observado na Figura 25.



**Figura 25 Modelo do MI completo com nós.**

Em alguns casos, ainda é inserida uma resistência paralela ao motor; conforme Zappellini (2008) a resistência deve ter um valor alto e sua função é fazer com que o motor reconheça o ramo que está conectado no nó e não produza erro durante a compilação. Na modelagem desse estudo foi inserida a resistência no valor de 1000 ohms.

### Cargas Não lineares

As cargas não lineares existentes nos serviços auxiliares da planta termoelétrica da Unidade 3 foram todas representadas através de injeção de fontes de corrente, conforme recomendado em Dugan *et al* (2002).

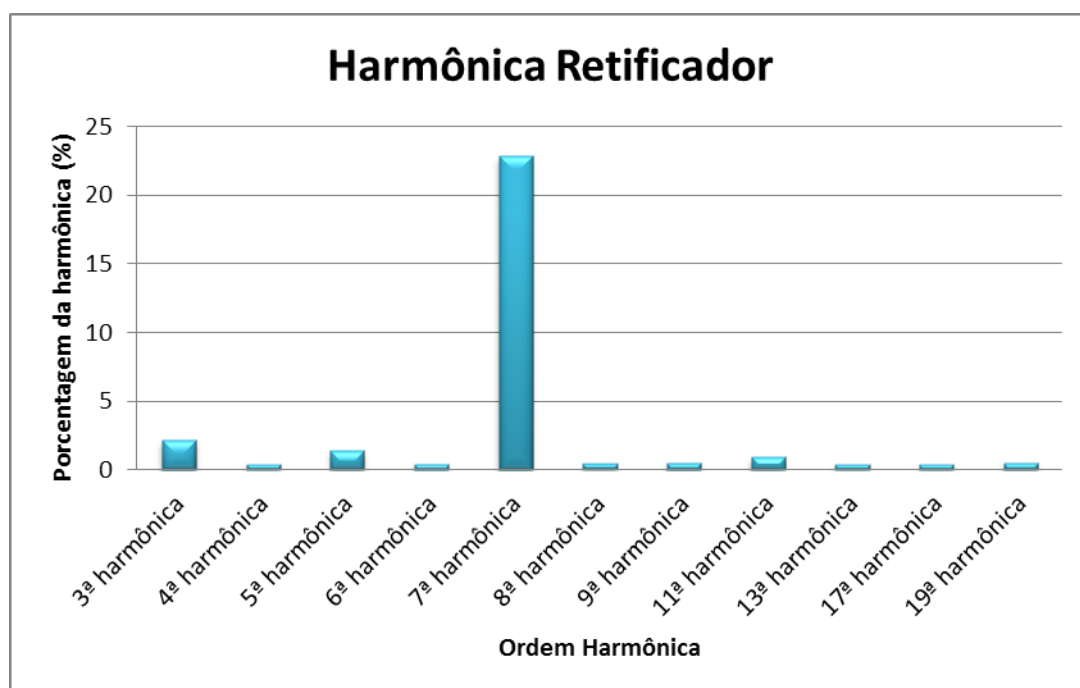
Os dispositivos elétricos que poderiam ter suas representações de circuito substituídas por injeção de fonte de corrente são:

- Precipitador

- Retificador
- UPS

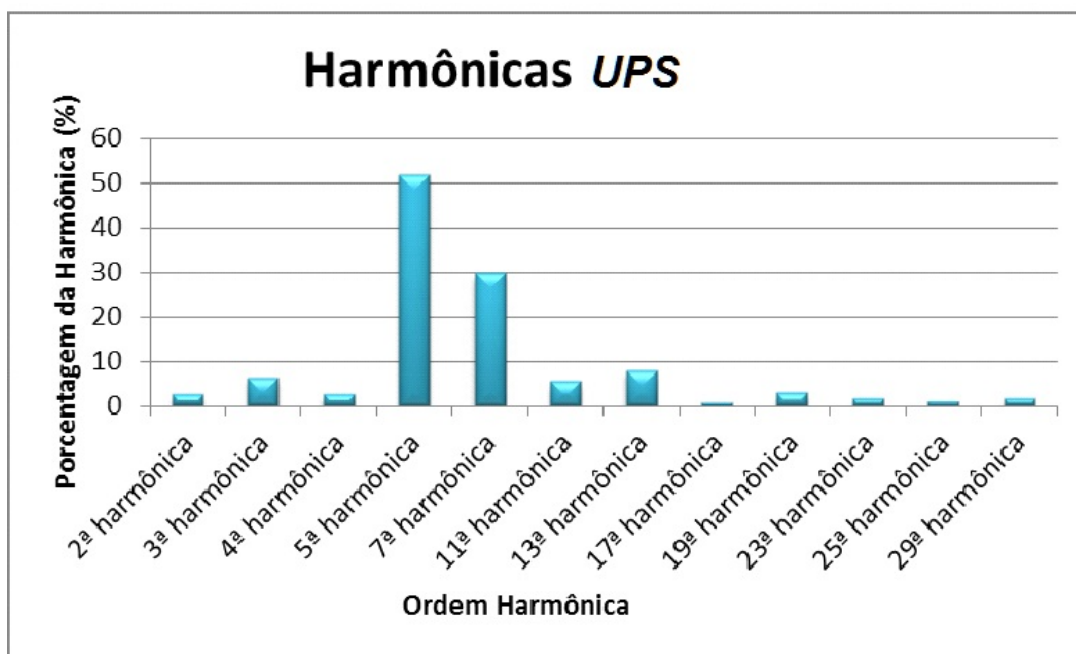
Então cada um deles foi representado com diversas fontes de corrente, que foram inseridas no ATP Draw com valores de frequência, de amplitude e de ângulo.

Esses valores são referentes às maiores ordens harmônicas que ocorreram por influência do equipamento no período de coleta de dados, obtidos com um medidor de QEE. As principais ordens harmônicas de cada equipamento podem ser observadas nos gráficos da Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

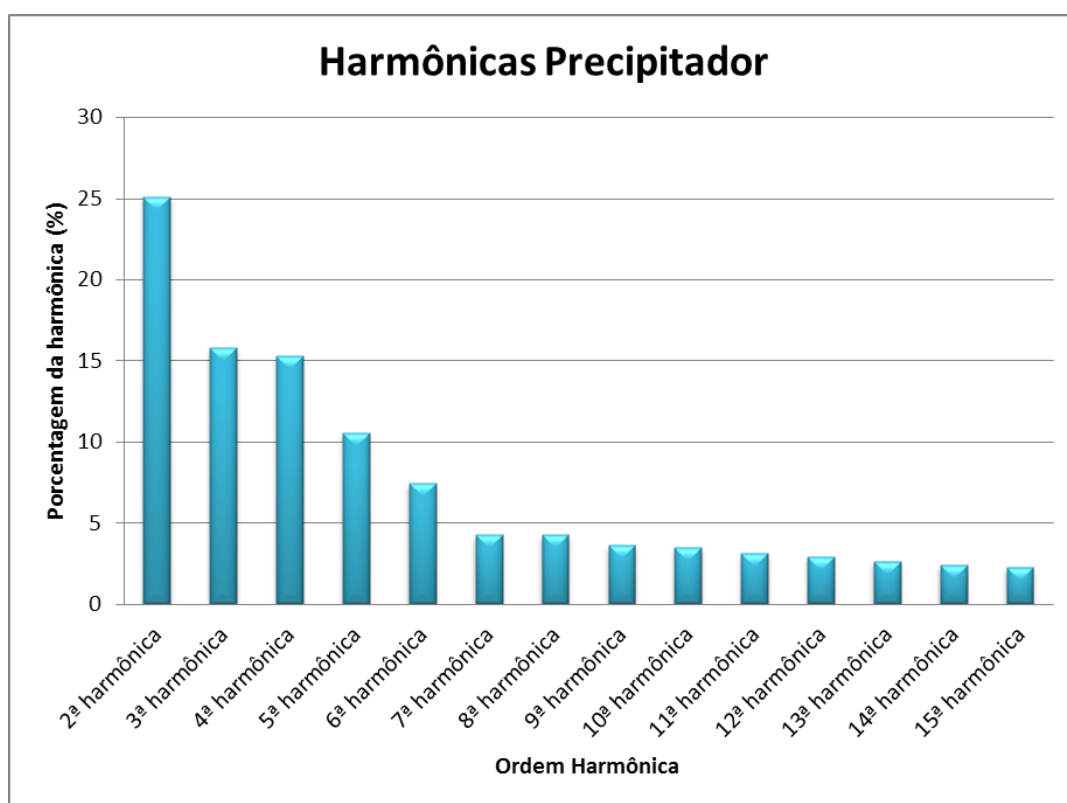


**Figura 26 Distorções harmônicas mais relevantes do Retificador.**

Nesta figura com as principais harmônicas do retificador, é observado que a sétima harmônica é a mais elevada, e algumas harmônicas típicas, como a quinta, não aparecem. Isto se deve ao fato de que há um filtro existente neste local, além disso, a o equipamento está operando praticamente a vazio, pois quando as baterias estão carregadas o mesmo apenas está alimentado a flutuação de tensão.



**Figura 27** Distorções harmônicas mais relevantes do UPS.



**Figura 28** Distorções harmônicas mais relevantes do Precipitador.

Esses gráficos foram elaborados através das informações dos arquivos de medições das distorções harmônicas obtidas nos pontos P2, P6 e P8, no período de 06 a

13 de dezembro de 2013. Foram selecionadas as ordens de distorções harmônicas mais relevantes, e feita a média delas, em porcentagem, para o período de coleta. Então, transformando a porcentagem em valor em Ampères, através de uma regra de três simples, sabendo-se o valor de corrente em 60 Hz, dado na Tabela 18, foi inserido o valor de corrente no modelo de injeção de fonte de corrente, Figura 29. A Tabela 18 mostra a corrente de cada equipamento, em regime permanente, para o período de uma semana; essa corrente foi utilizada para calcular as correntes de cada ordem harmônica dos equipamentos. Os valores das frequências (em Hz) e suas respectivas correntes harmônicas (em A) para cada um dos equipamentos estão no Anexo E.

**Tabela 18: Corrente dos equipamentos**

Equipamento	Corrente (Valor eficaz)
Retificador	27 A
Precipitador	182 A
<i>UPS</i>	14 A

A Figura 29 mostra o ícone do ATP Draw que representa a injeção de fonte de corrente, ou seja, uma fonte ideal, *AC SOURCE*, que foi selecionada em *Type of source* como *current*.



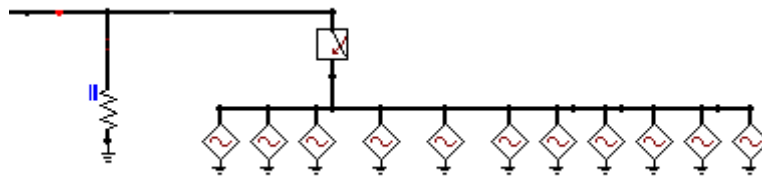
**Figura 29 Injeção de corrente no ATP Draw.**

Cada fonte de corrente foi considerada trifásica selecionando *Num phases* 3\*1-phase no ATP Draw, e foram inseridos os valores dos ângulos conforme a Tabela 19, que mostra qual é o ângulo da fase a, b e c, conforme a sequência (negativa, positiva ou zero), para cada ordem de harmônica (*h*).

**Tabela 19: Sequência e ângulos conforme a ordem harmônica**

Ordem Harmônica	Sequência da Harmônica	Fase A	Fase B	Fase C
1	+	0	-120	120
2	-	0	120	-120
3	0	0	0	0
4	+	0	-120	120
5	-	0	120	-120
6	0	0	0	0
7	+	0	-120	120
8	-	0	120	-120
9	0	0	0	0
10	+	0	-120	120
11	-	0	120	-120
13	+	0	-120	120
19	+	0	-120	120
23	-	0	120	-120

Cada uma das cargas, precipitador, retificador e *UPS*, teve sua representação da parte ativa (frequência fundamental) com uma resistência em paralelo às injeções de corrente harmônica, conforme a Figura 30. O valor da resistência foi calculada com os valores de tensão e corrente obtidos nas medições desconsiderando-se o fator de deslocamento.



**Figura 30 Modelo cargas não lineares**

#### 4.2.3 Outros recursos do ATP Draw utilizados

Outros recursos do ATP Draw, importantes para esta modelagem e simulação foram os *probes* e os *switches*. Eles serão melhor explicados a seguir.

Os *probes* são medidores virtuais do ATP Draw; eles são inseridos em qualquer ponto das linhas para se obter o resultado naquele local. No presente estudo, foram utilizados os *probes* que medem tensão e corrente; em cada medidor pode-se selecionar o número de fases a ser medido, como o sistema modelado é trifásico, os *probes* foram selecionados para medir 3 fases. Os resultados são dados em gráficos que apresentam a forma de onda da tensão ou corrente. Os ícones para medição de tensão e corrente são mostrados nas Figura 31 e Figura 32.



**Figura 31 Probe (medidor) de tensão.**

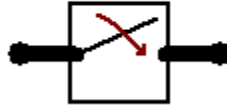


**Figura 32 Probe (medidor) de corrente.**

Os *switches* são chaves, ou disjuntores, que servem para fechar ou abrir o circuito de alguma parte do sistema modelado. O tipo utilizado na análise deste estudo

foi o *switch time 3-ph*. Os motivos para se utilizar as chaves são variados, o principal motivo do uso nesta simulação foi para desconectar cargas, para medir algum ponto sem elas.

Da mesma forma que os *probes*, o *switch* pode ser alocado em qualquer linha da simulação. Para conseguir utilizar o *switch* como se o circuito estivesse aberto naquele ponto, é necessário inserir, nos dados de entrada do ícone, um valor de tempo menor do que o valor de tempo do início da simulação. E se estiver um valor de tempo maior do que o valor do tempo final de simulação, o ATP Draw entende que a chave estava fechada durante toda a simulação. Caso o valor de tempo inserido seja entre o valor de início e o valor de final, na plotagem será observada alguma mudança na forma de onda. O ícone do tipo de *switch* utilizado é dado na Figura 33.



**Figura 33 Ícone do *switch*.**

A modelagem completa elaborada no ATP Draw pode ser vista na figura do ANEXO F. Observa-se desde os geradores, tanto o da usina como o que representa a SE Eletrosul, de 230 kV, os circuitos trifásicos que interligam os componentes, os transformadores existentes na usina, os equipamentos com eletrônica de potência, e sua representação com injeção de correntes e por fim os motores, modelados complexamente como motores de indução.



### 5 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com todo o sistema elétrico da Unidade 3, da planta termoeletrica Jorge Lacerda, modelado no ATP Draw, conforme descrito no capítulo 4, iniciaram-se as simulações para quantificar as distorções harmônicas de corrente e tensão nos pontos pré-determinados, P4, P10, P6, P8 e P2, conforme a Figura 34.

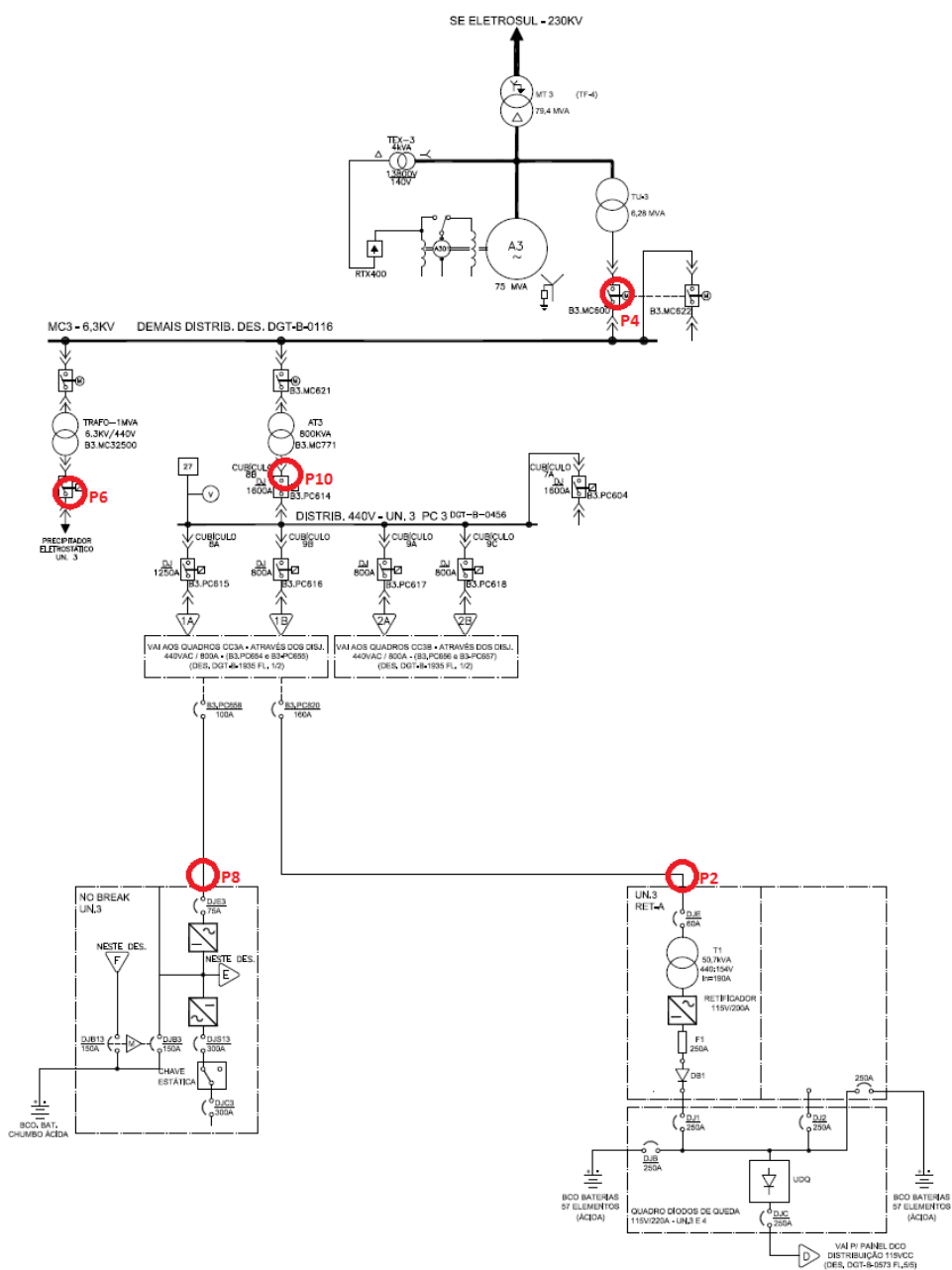


Figura 34 Pontos de medição da UN3.

## 5.1 MODELAGEM E SIMULAÇÃO EM FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Primeiramente foram conferidas se as tensões e correntes nos principais locais de interesse estavam de acordo com a realidade da usina em regime permanente, para isso os disjuntores das cargas não lineares foram programados para ficarem abertos durante a simulação, ou seja, o tempo inserido em cada um deles foi 55 segundos (acima do tempo de simulação).

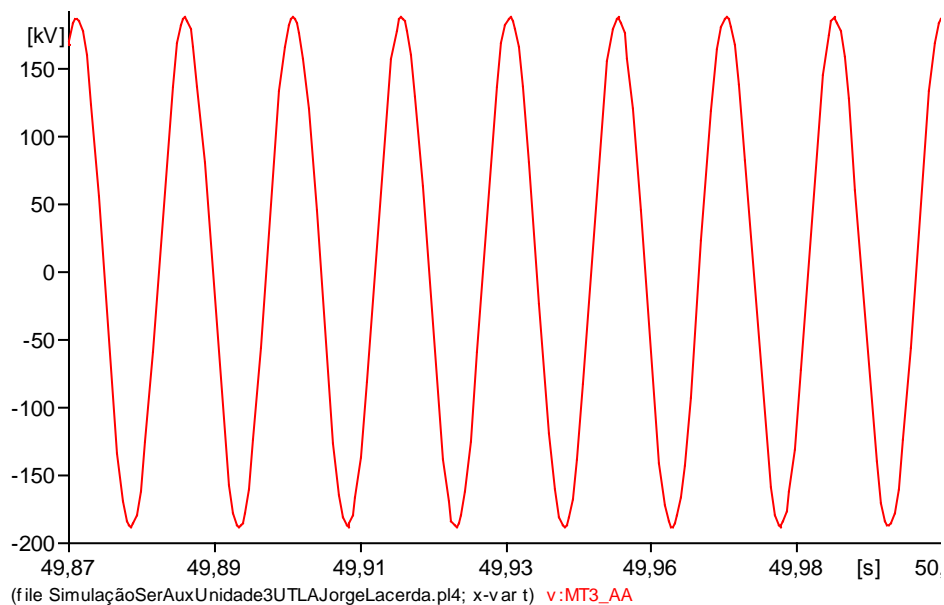
Então, foram verificadas as tensões nas barras principais, de 230 kV, de 13,8 kV, de 6,3 kV e de 440V. Para isto, foram inseridos os voltímetros nos locais, que apontaram tensões iguais ou muito próximas dos valores nominais (com menos de 5% de diferença), conforme a Tabela 20. É necessário perceber que o programa ATP Draw fornece os resultados das tensões fase-neutro em valores de pico.

**Tabela 20: Tensões nominais x Tensões simuladas no ATP**

	Tensões Nominais de pico (Vp)	Tensões Simuladas de pico (Vp)
Barra 230 kV	188 kV	188 kV
Barra 13,8 kV	11,3 kV	11,3 kV
Barra 6,3 kV	5,14 kV	5,0 kV
Barra 440 V	359 V	346 V

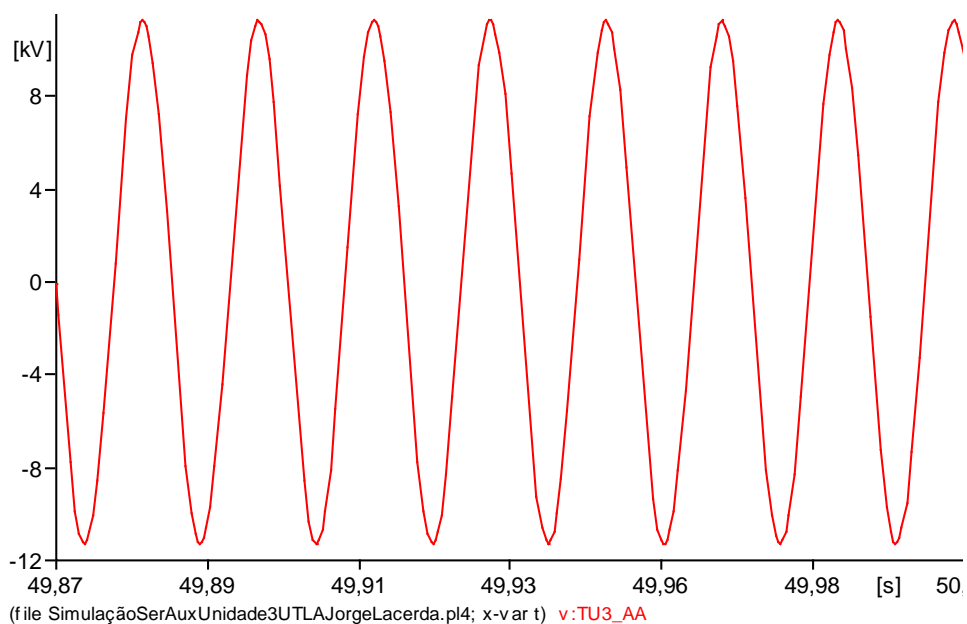
A Tabela 20 mostra, na primeira coluna, qual é o valor da tensão, segundo o diagrama unifilar, em cada barra. Na segunda coluna é observado o valor de pico da tensão de fase nominal. E a terceira coluna da tabela, mostra o resultado da simulação, conforme a modelagem feita no ATP Draw. Nas Figuras 34-37 é possível verificar os gráficos das tensões em cada barra, obtidas no programa.

A Figura 35 é referente à barra de interligação com SE Eletrosul, de 230 kV, e o valor de pico da tensão de fase é igual ao valor de 188 kV.



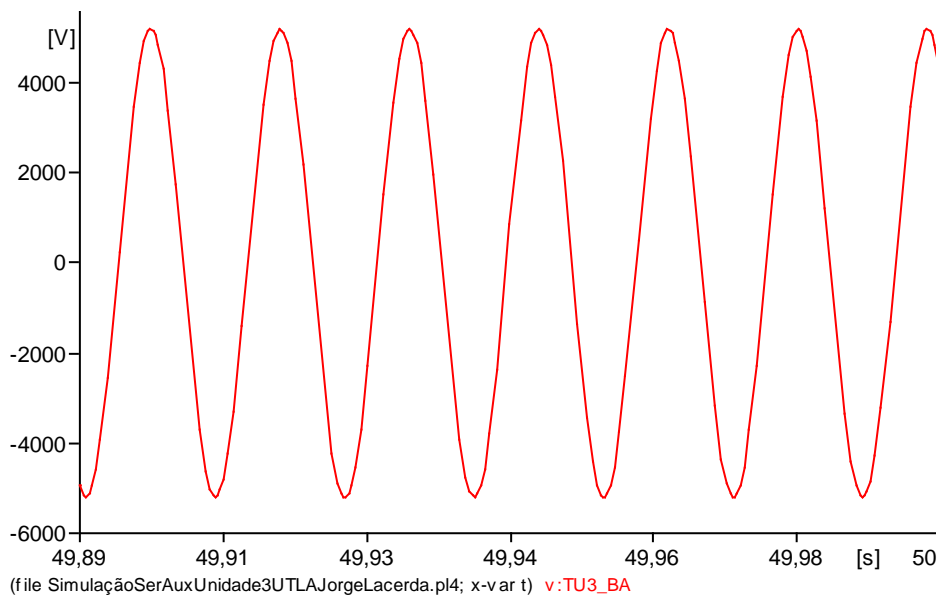
**Figura 35 Tensão na barra de 230 kV.**

A Figura 36 mostra a tensão da barra de 13,8 kV, com o valor de pico da tensão de fase igual a 11,3 kV.



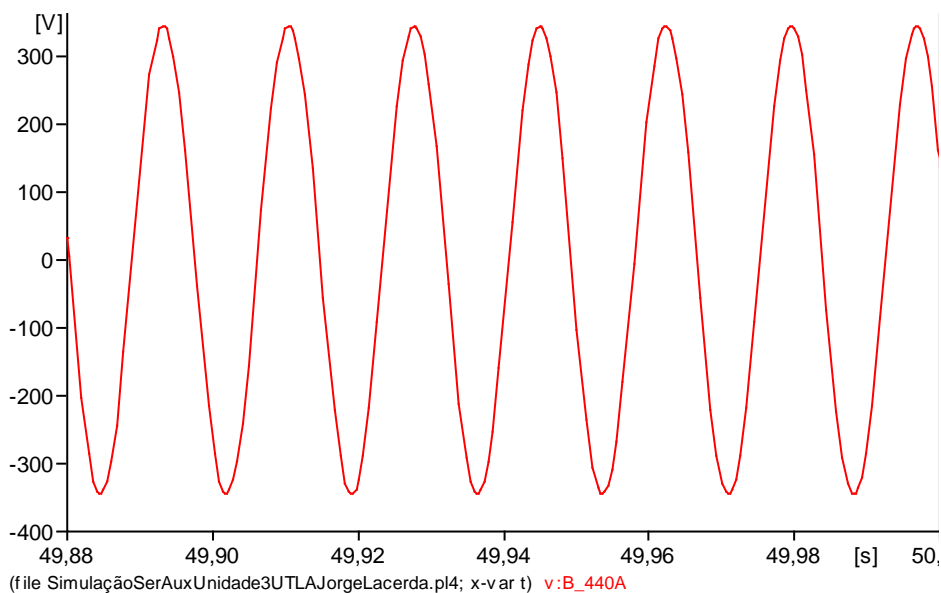
**Figura 36 Tensão na barra de 13,8 kV.**

A tensão da barra de 6,3 kV é observada na Figura 37. Nesta barra estão os motores principais e também o precipitador, eles podem ter influência direta na elevação ou queda de tensão desta barra.



**Figura 37 Tensão na barra de 6,3 kV.**

Na barra de 440 V estão conectados o retificador, o *UPS*, os motores médios e os motores pequenos. O valor de pico da tensão de fase deveria ser de 359 V, mas o resultado da simulação foi de 346 V, um pouco abaixo do valor nominal, a queda de tensão neste caso foi de menos de 4%.



**Figura 38 Tensão na barra de 440 V.**

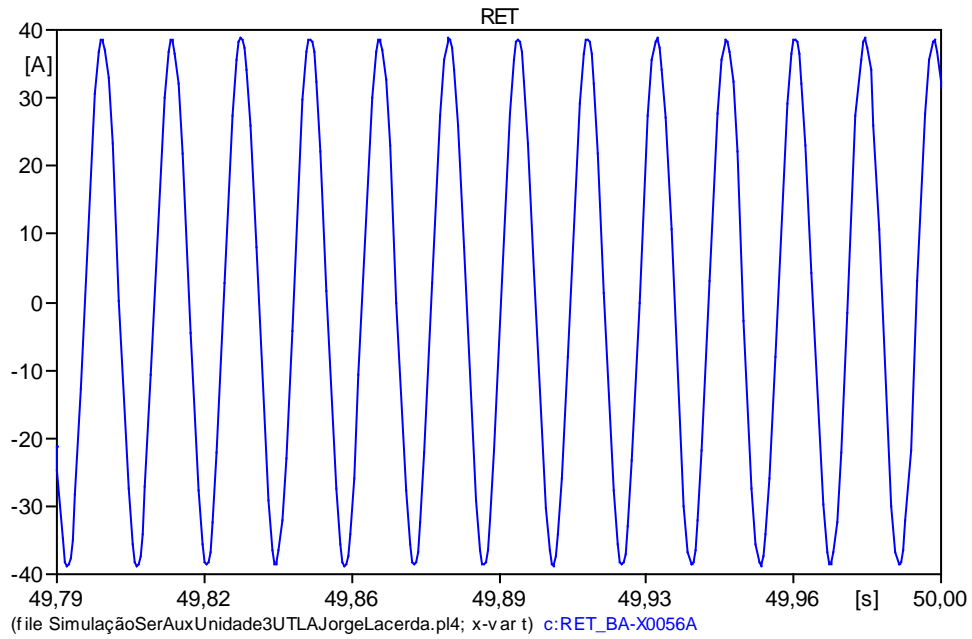
Então foram verificadas as correntes de cada carga, que podem ser observadas na Tabela 21.

**Tabela 21: Correntes das cargas**

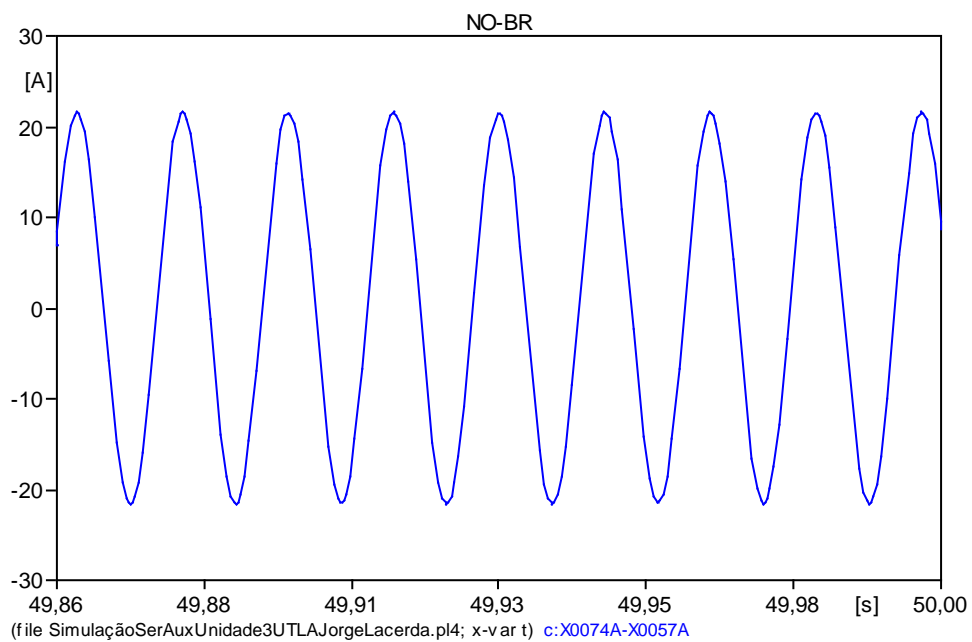
	VALORES MEDIDOS (pico) [A]	VALORES NOMINAIS (pico) [A]	VALORES SIMULADOS (pico) [A]
RET_A	40	-	39
NO_BR	21	-	22
PRE_	257	-	257
MOT1	-	271	248
MOT2A	-	42	36
MOT2B	-	42	36
MOT3A	-	31	21
MOT3B	-	31	21
MOT3C	-	31	21
MOT4A	-	27	19
MOT4B	-	27	19
MOT5A	-	42	31
MOT5B	-	42	31
MOT6A	-	45	31
MOT6B	-	45	31
MOT8A	-	27	19
MOT8B	-	27	19
MOT8C	-	27	19
M_440	-	108	67

A diferença observada nas correntes dos motores se deve, provavelmente, ao superdimensionamento das máquinas durante a construção da usina, na década de 50. Naquela época a localidade era bastante erma, existia certa dificuldade de acesso, e não existia total noção de qual seria a real necessidade de funcionamento futuro da usina.

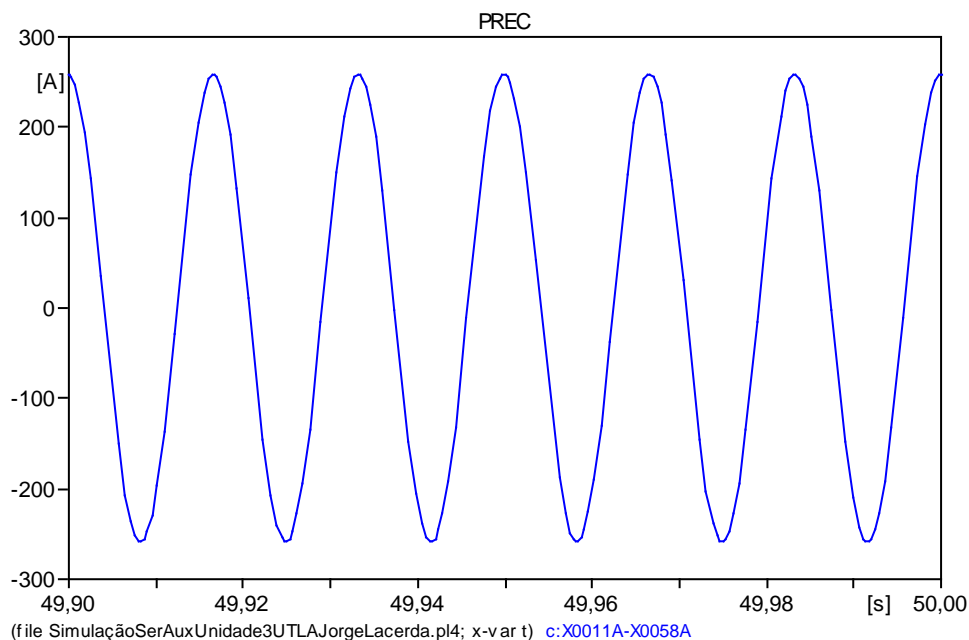
As correntes de frequência fundamental das cargas não lineares podem ser vistas nas Figura 39, 40 e 41. Os valores de pico das correntes foram mostrados na Tabela 21.



**Figura 39** Corrente de frequência fundamental do Retificador

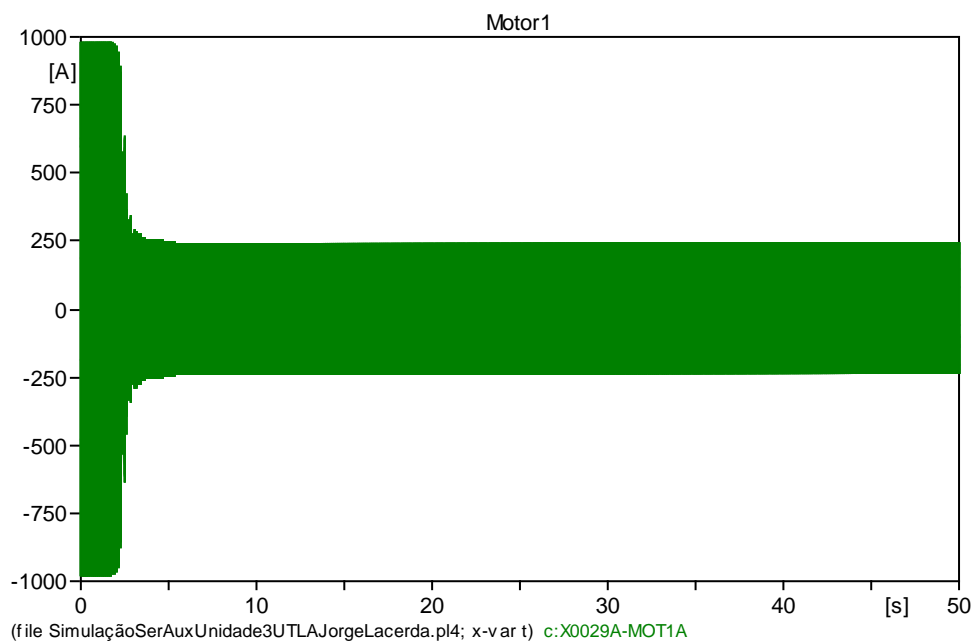


**Figura 40** Corrente de frequência fundamental do UPS



**Figura 41 Corrente de frequência fundamental do Precipitador**

Na Figura 42 é observada a corrente de um dos motores dos serviços auxiliares, através da figura, podemos observar a correta representação da corrente de partida, bem maior que a corrente nominal nos primeiros segundos.



**Figura 42: Corrente de frequência fundamental do Motor 1**

Os valores das correntes desses equipamentos, simulados no ATP Draw, ficaram muito próximos dos valores medidos na planta, como pode ser observado na Tabela 21.

## 5.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO COM INJEÇÃO DE HARMÔNICAS

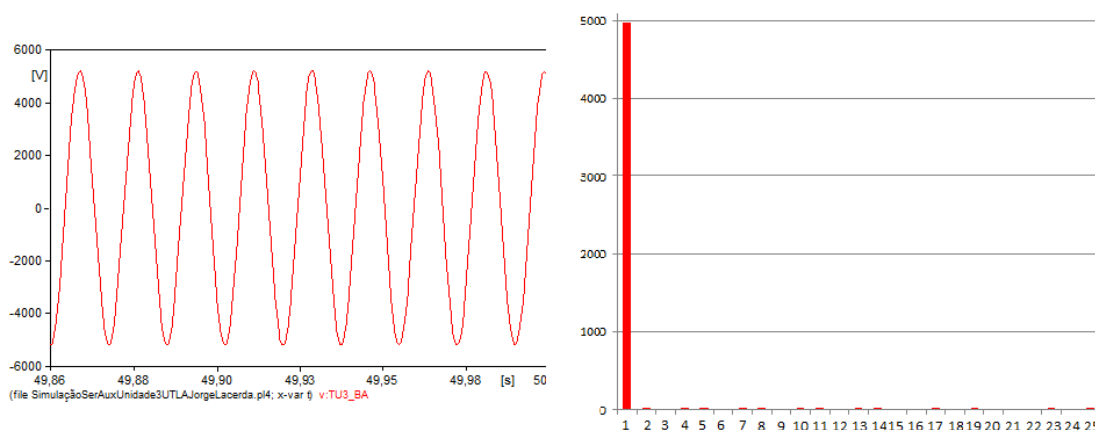
Após a verificação dos valores em regime permanente, para a frequência fundamental, o programa foi rodado com as injeções harmônicas das cargas não lineares.

Para essa simulação foram verificadas as tensões e correntes somente nos pontos de interesse, P2, P4, P6, P8 e P10.

### Ponto 4

Esse é o ponto mais distante das cargas não lineares que existem no sistema modelado; o ponto 4 está no secundário do transformador denominado TU3, que conecta os serviços auxiliares a barra de 230 kV da SE da usina termoeletrica .

O comportamento da tensão e a decomposição da mesma neste ponto podem ser verificados na Figura 43. Não há distorções visíveis na forma de onda da tensão, e a amplitude não variou quando comparada à amplitude de tensão de frequência fundamental.

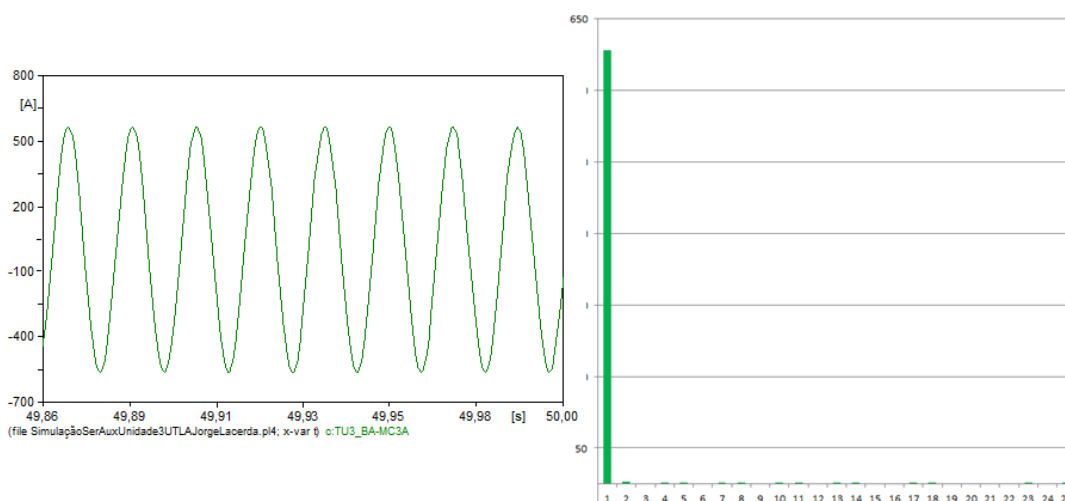


**Figura 43 Tensão simulada no P4**

O comportamento da corrente medida no P4 também não mostra distorções visíveis na forma de onda obtida no ATP Draw. O fato de não aparecerem harmônicas



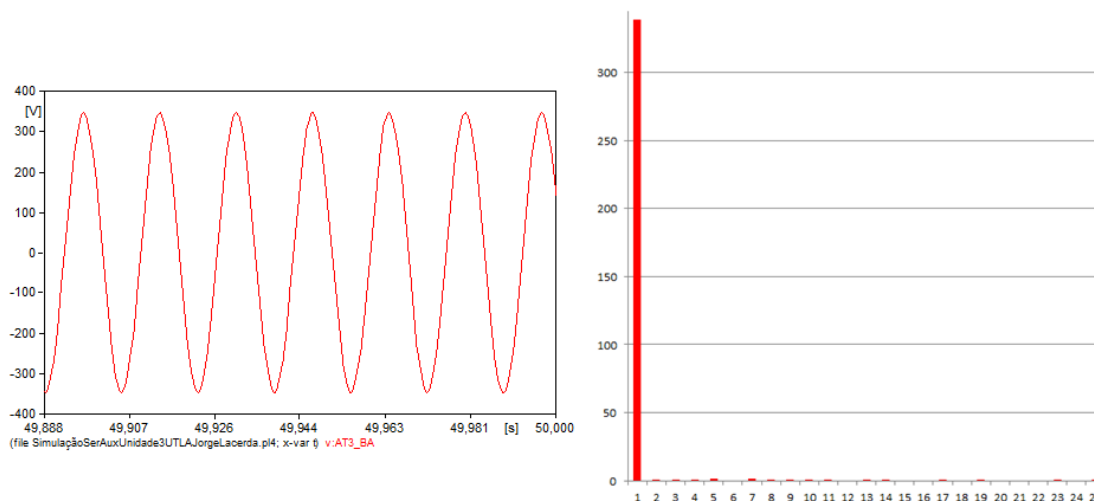
na onda pode ser devido à distância de ocorrência das mesmas, ou também, pela quantidade de transformadores existentes nas linhas que chegam a esse ponto, entre eles um transformador com conexão delta-delta, que pode ter filtrado harmônicas múltiplas de 3.



**Figura 44 Corrente simulada no P4**

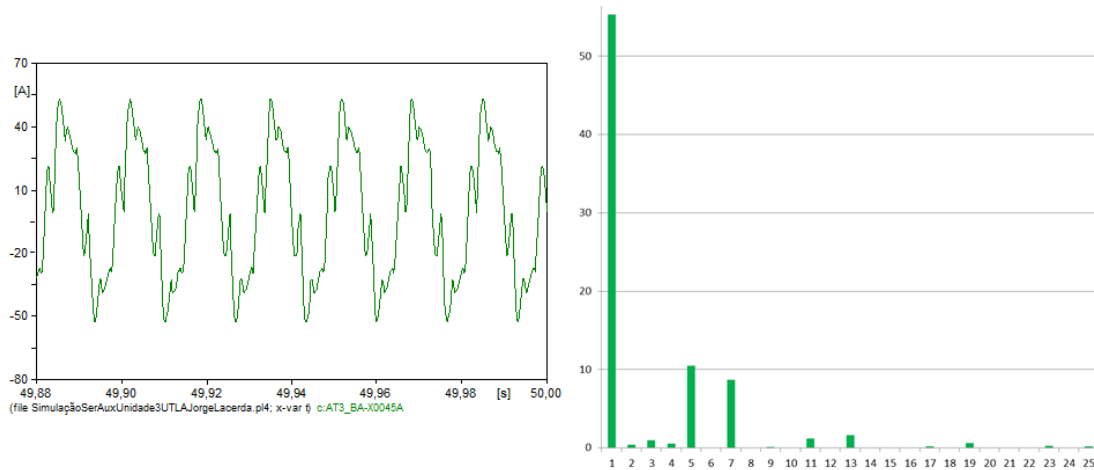
### Ponto 10

Este ponto é no secundário do transformador AT3; no diagrama unifilar podemos observar a quantidade de cargas que estão conectadas àquela barra de 440 V, inclusive o retificador e o *UPS*, além de motores médios e pequenos. O comportamento da tensão é verificado na Figura 45, e não aparecem distorções visíveis na forma de onda.



**Figura 45 Tensão simulada no P10**

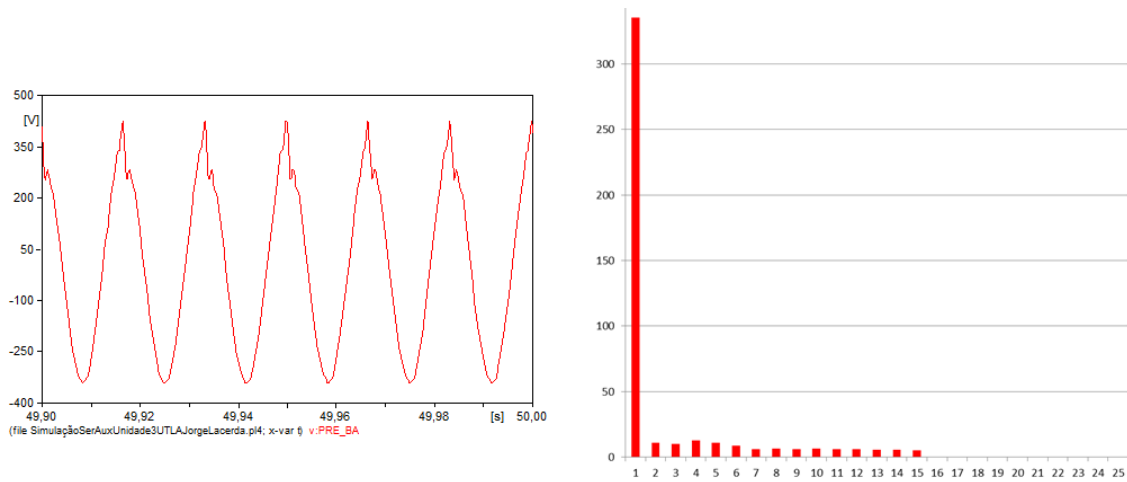
O comportamento da corrente no ponto 10 pode ser observado na Figura 46; aqui percebe-se a quantidade de distorção que está ocorrendo devido as cargas não lineares que estão conectados a barra de distribuição de 440 V.



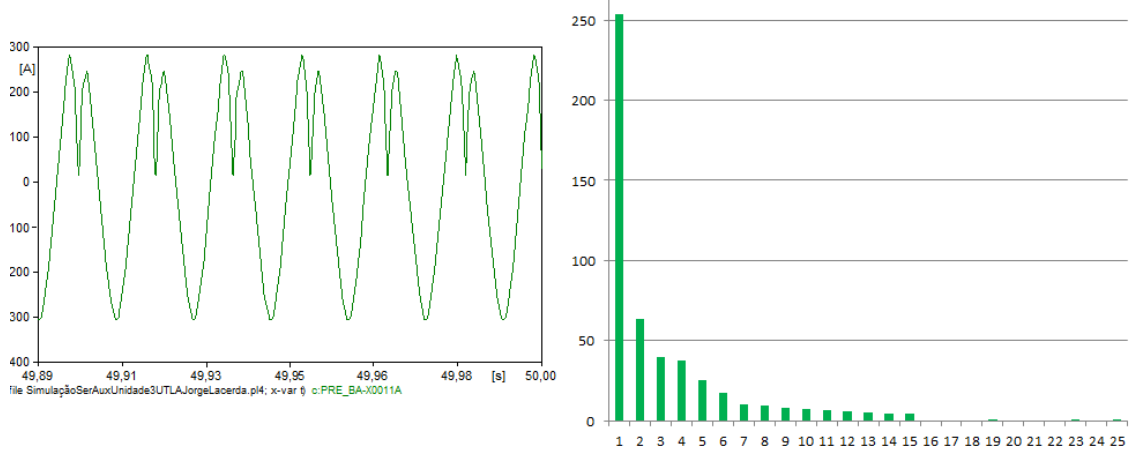
**Figura 46 Corrente simulada no P10**

### Ponto 6

O ponto 6 está localizado no ponto de conexão do precipitador eletrostático; a simulação pelo ATP Draw mostra distorções consideráveis e bastante visíveis na forma de onda da tensão, conforme Figura 47, e também da corrente, conforme Figura 48.



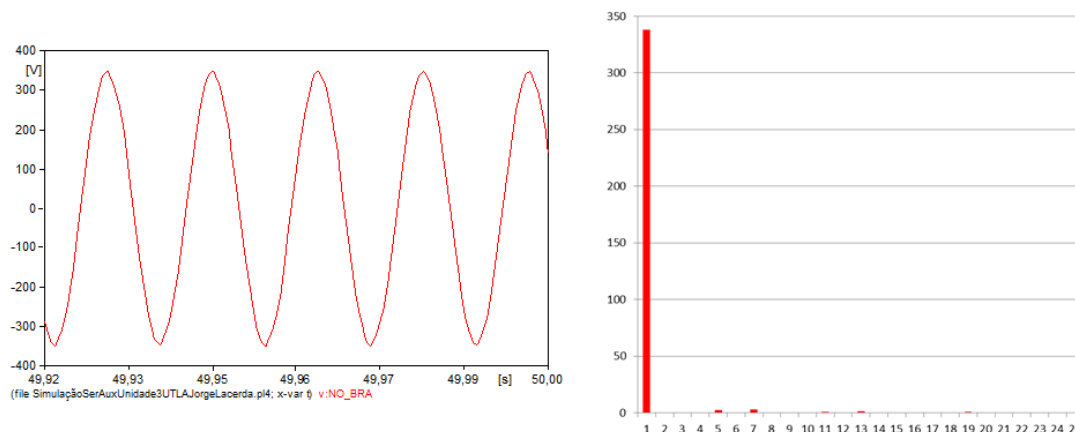
**Figura 47 Tensão simulada no P6**



**Figura 48 Corrente simulada no P6**

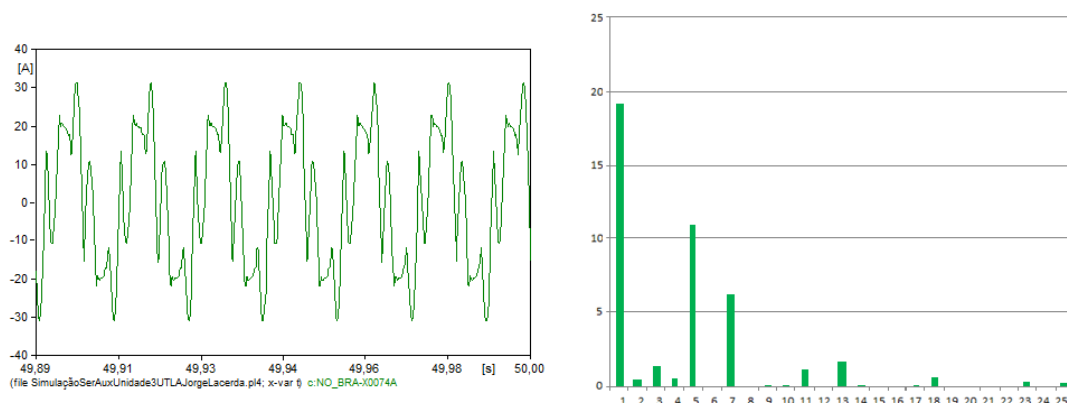
### Ponto 8

O ponto de monitoração 8 está no ponto de conexão do *UPS*, o gráfico da onda da tensão não mostra muitas distorções visíveis, como observado na Figura 49.



**Figura 49 Tensão simulada no P8**

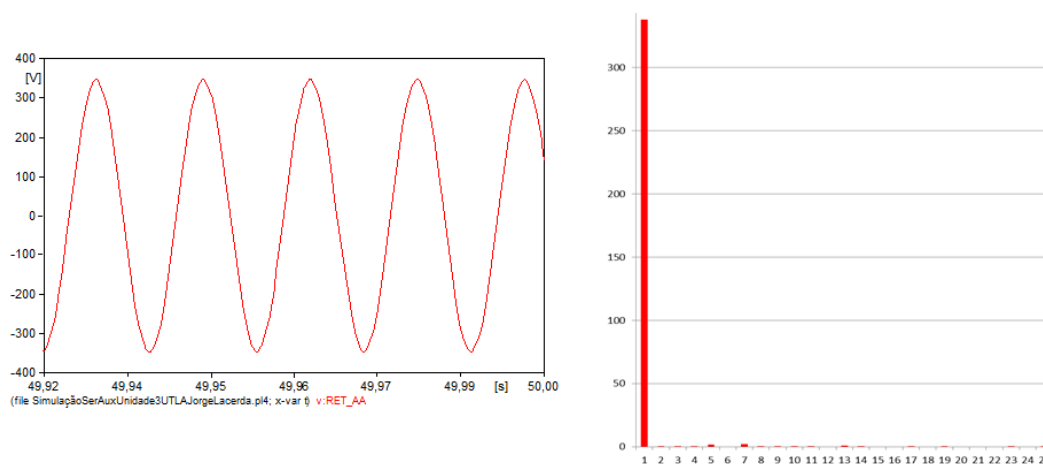
Já o gráfico da corrente, mostra a quantidade de distorções geradas por esse equipamento, visíveis pelo comportamento da corrente.



**Figura 50 Corrente simulada no P8**

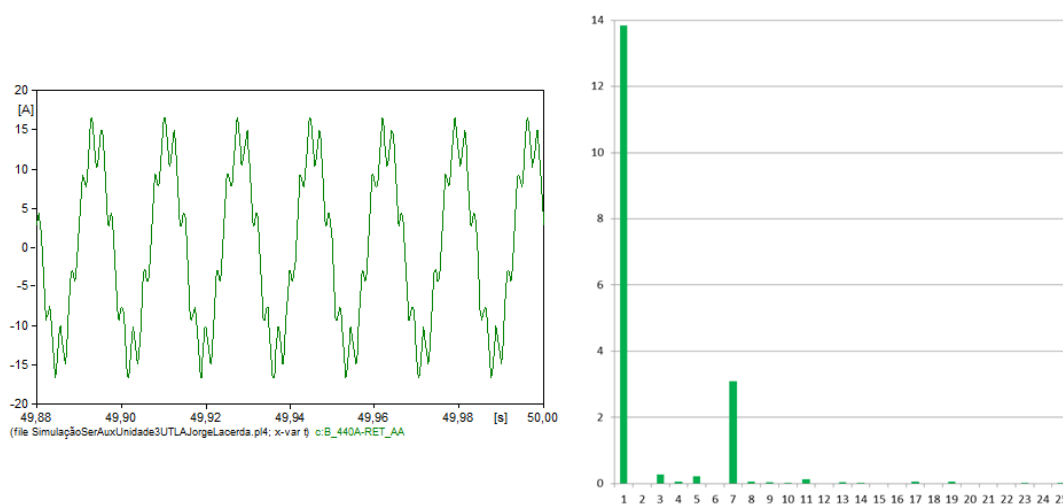
### Ponto 2

Esse ponto está na conexão do retificador A; a Figura 51 mostra o comportamento da forma de onda da tensão naquele ponto, onde as distorções são pouco visíveis.



**Figura 51 Tensão simulada no P2**

O comportamento da corrente no ponto P2 é visto na Figura 52, onde aparecem visivelmente as distorções harmônicas presentes no ponto.



**Figura 52 Corrente simulada no P2**

### 5.3 RESULTADOS E COMPARAÇÃO

Após a obtenção de todos os gráficos com as formas de onda das tensões e correntes nos pontos especificados, foi aplicada a Transformada Rápida de Fourier, para então se obter as componentes harmônicas simuladas e calcular a distorção total de cada ponto, para posterior comparação com as medições *in loco*.

As tabelas 22-31 são referentes aos cálculos das Distorções Harmônicas de tensão e corrente. Na primeira coluna de cada tabela estão as frequências harmônicas. Na segunda coluna o valor de pico da componente harmônica da tensão ou corrente no ponto. E na terceira coluna a distorção harmônica individual (DHI). Ao final de cada tabela, é dada a distorção harmônica total (DHT).

A Tabela 22 mostra a decomposição da tensão simulada no ATP Draw no ponto 4, na barra de 6,3 kV, e o cálculo da distorção harmônica total de tensão neste ponto.

Percebe-se que as distorções harmônicas individuais de tensão são baixas neste ponto para todas as ordens harmônicas, estando sempre abaixo de 0,1%. E a distorção harmônica total, chega ao resultado de 0,17%.

**Tabela 22: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 4**

FREQ.(Hz)	Valor de Pico (V)	DHI
60	4881	-
120	3,24	<b>0,07%</b>
180	0,00	<b>0,00%</b>
240	3,85	<b>0,08%</b>
300	3,76	<b>0,08%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	3,10	<b>0,06%</b>
480	1,94	<b>0,04%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	1,88	<b>0,04%</b>
660	1,84	<b>0,04%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	2,14	<b>0,04%</b>
840	1,58	<b>0,03%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,08	<b>0,00%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,28	<b>0,01%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
	<b>DHTt</b>	<b>0,17%</b>

A Tabela 23 mostra a decomposição da corrente no P4, e o cálculo da distorção harmônica total de corrente.

No caso das distorções individuais de corrente, as que são mais relevantes são as de 2ª ordem, 3ª ordem, 4ª ordem, 5ª ordem e 7ª ordem, conforme mostra a tabela. E a distorção harmônica total de corrente foi de 0,63%.

**Tabela 23: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 4**

FREQ.(Hz)	Valor de pico (A)	DH <sub>i</sub>
60	642,1	-
120	3,05	<b>0,48%</b>
180	0,00	<b>0,00%</b>
240	1,89	<b>0,29%</b>
300	1,42	<b>0,22%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	0,84	<b>0,13%</b>
480	0,44	<b>0,07%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,36	<b>0,06%</b>
660	0,30	<b>0,05%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	0,31	<b>0,05%</b>
840	0,20	<b>0,03%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,01	<b>0,00%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,02	<b>0,00%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
<b>DHT<sub>i</sub></b>		<b>0,63%</b>

A Tabela 24 mostra a decomposição da tensão no P10, onde a tensão é de 440 V, e o cálculo da DHT de tensão.

Neste ponto as distorções individuais de tensão que merecem destaque são as de 5ª ordem e 7ª ordem, as demais foram de 0,1% ou menos. O total da distorção harmônica de tensão para o ponto 10 foi de 0,54%.

**Tabela 24: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 10**

FREQ. (Hz)	Valor de pico (V)	DHIt
60	339,9	-
120	0,22	<b>0,07%</b>
180	0,05	<b>0,01%</b>
240	0,29	<b>0,09%</b>
300	1,06	<b>0,31%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	1,27	<b>0,37%</b>
480	0,13	<b>0,04%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,12	<b>0,04%</b>
660	0,26	<b>0,08%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	0,51	<b>0,15%</b>
840	0,11	<b>0,03%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,06	<b>0,02%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,23	<b>0,07%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
1380	0,13	<b>0,04%</b>
1440	0,00	<b>0,00%</b>
1500	0,08	<b>0,02%</b>
	<b>DHTt</b>	<b>0,54%</b>

A Tabela 25 mostra a decomposição da corrente e cálculo da DHT da corrente no P10.

As distorções harmônicas individuais de corrente de 5ª ordem e 7ª ordem são alarmantes neste ponto. E a distorção harmônica total obtida, num valor de 23,38%, é muito alto também.



**Tabela 25: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 10**

FREQ. (Hz)	Valor de pico (A)	DHI <sub>t</sub>
60	55,29	-
120	0,38	<b>0,69%</b>
180	0,92	<b>1,66%</b>
240	0,48	<b>0,87%</b>
300	9,75	<b>17,63%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	8,19	<b>14,81%</b>
480	0,03	<b>0,05%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,02	<b>0,04%</b>
660	1,09	<b>1,97%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	1,49	<b>2,69%</b>
840	0,02	<b>0,04%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,18	<b>0,33%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,58	<b>1,06%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
1380	0,27	<b>0,49%</b>
1440	0,00	<b>0,00%</b>
1500	0,15	<b>0,28%</b>
	<b>DHT<sub>i</sub></b>	<b>23,38%</b>

A Tabela 26 mostra a decomposição da tensão no Ponto 6, do precipitador e o cálculo da distorção total de tensão.

As distorções individuais de tensão do P6 são maiores nas ordens 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15. Após a 15ª harmônica elas ficam irrelevantes. E a distorção harmônica total de tensão resulta em 8,85%.

**Tabela 26: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 6**

FREQ. (Hz)	Valor de pico (V)	DHI <sub>t</sub>
60	336,4	-

120	10,76	<b>3,20%</b>
180	9,81	<b>2,92%</b>
240	12,76	<b>3,79%</b>
300	10,90	<b>3,24%</b>
360	8,80	<b>2,62%</b>
420	5,93	<b>1,76%</b>
480	6,53	<b>1,94%</b>
540	5,98	<b>1,78%</b>
600	6,32	<b>1,88%</b>
660	6,12	<b>1,82%</b>
720	5,91	<b>1,76%</b>
780	5,71	<b>1,70%</b>
840	5,41	<b>1,61%</b>
900	5,25	<b>1,56%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,00	<b>0,00%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,01	<b>0,00%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
<b>DHTt</b>		<b>8,85%</b>

A Tabela 27 mostra a decomposição da corrente no ponto 6, do precipitador, e o cálculo da distorção harmônica total da corrente naquele ponto.

Nas distorções individuais de corrente, o destaque é para a 2ª ordem, 3ª ordem, 4ª ordem, 5ª ordem e 6ª ordem, após essas a distorção decresce gradativamente até ficar muito baixa da 16ª ordem em diante. O total de distorção harmônica foi de 36,22%.

**Tabela 27: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 6**

FREQ. (Hz)	CORRENTE ATP (A)	DHIi
60	252,9	-
120	63,30	<b>25,03%</b>
180	39,45	<b>15,60%</b>
240	37,60	<b>14,87%</b>
300	25,61	<b>10,13%</b>
360	17,67	<b>6,99%</b>
420	9,82	<b>3,88%</b>
480	9,57	<b>3,78%</b>
540	7,97	<b>3,15%</b>

600	7,39	<b>2,92%</b>
660	6,48	<b>2,56%</b>
720	5,86	<b>2,32%</b>
780	5,06	<b>2,00%</b>
840	4,46	<b>1,77%</b>
900	4,12	<b>1,63%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,00	<b>0,00%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,01	<b>0,00%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
<b>DHTi</b>		<b>36,22%</b>

A Tabela 28 mostra a decomposição da tensão no ponto 8, do *UPS*, e o cálculo da DHT de tensão.

Nas distorções harmônicas individuais do P8, exceto na 5ª ordem e na 7ª ordem, que apontaram 0,71% e 0,75%, as demais foram abaixo de 0,5%. E o total para este ponto foi 1,12%.

**Tabela 28: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 8**

FREQ. (Hz)	Valor de pico (V)	DHTi
60	339	-
120	0,23	<b>0,07%</b>
180	0,14	<b>0,04%</b>
240	0,32	<b>0,10%</b>
300	2,40	<b>0,71%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	2,55	<b>0,75%</b>
480	0,13	<b>0,04%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,12	<b>0,04%</b>
660	0,57	<b>0,17%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	1,04	<b>0,31%</b>
840	0,10	<b>0,03%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,14	<b>0,04%</b>

1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,53	<b>0,16%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
1380	0,32	<b>0,09%</b>
1440	0,00	<b>0,00%</b>
1500	0,20	<b>0,06%</b>
<hr/>		
	<b>DHTi</b>	<b>1,12%</b>

A Tabela 29 mostra a decomposição da corrente do *UPS*, e o cálculo da distorção harmônica total do ponto 8.

Para a distorção individual de corrente no P8, a preocupação é com a 5ª ordem e com a 7ª ordem, que tiveram resultados muito elevados. Sendo a 3ª ordem, 11ª ordem, 13ª ordem e 19ª ordem também consideráveis. O resultado da distorção harmônica total neste ponto é o maior entre todos os pontos analisados, 62,01%.

**Tabela 29: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 8**

FREQ. (Hz)	CORRENTE ATP (A)	DHTi
60	19,26	-
120	0,47	<b>2,44%</b>
180	1,24	<b>6,43%</b>
240	0,51	<b>2,64%</b>
300	10,14	<b>52,65%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	5,82	<b>30,23%</b>
480	0,00	<b>0,00%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,00	<b>0,00%</b>
660	1,05	<b>5,47%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	1,53	<b>7,95%</b>
840	0,00	<b>0,02%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,14	<b>0,76%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,56	<b>2,89%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>

1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
1380	0,29	<b>1,50%</b>
1440	0,00	<b>0,00%</b>
1500	0,16	<b>0,86%</b>
<b>DHTt</b>		<b>62,01%</b>

A Tabela 30 mostra a decomposição da tensão no retificador, ponto 2, e o cálculo da DHT de tensão.

As distorções individuais de tensão no P2 foram relativamente baixas, com exceção da 5ª ordem e da 7ª ordem, todas elas ficaram abaixo de 0,45%. E o total de distorção de tensão foi 0,82%.

**Tabela 30: Distorção harmônica da tensão simulada no ponto 2**

FREQ. (Hz)	Valor de pico (V)	DHIt
60	339,3	-
120	0,22	<b>0,07%</b>
180	0,08	<b>0,02%</b>
240	0,31	<b>0,09%</b>
300	1,63	<b>0,48%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	1,97	<b>0,58%</b>
480	0,14	<b>0,04%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,12	<b>0,04%</b>
660	0,40	<b>0,12%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	0,75	<b>0,22%</b>
840	0,10	<b>0,03%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,10	<b>0,03%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,37	<b>0,11%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
1380	0,21	<b>0,06%</b>
1440	0,00	<b>0,00%</b>
1500	0,13	<b>0,04%</b>

	<b>DHTt</b>	<b>0,82%</b>
--	-------------	--------------

A Tabela 31 mostra a decomposição da corrente do retificador, e o cálculo da distorção harmônica total no ponto 2.

A exceção para as distorções individuais de corrente foi para 7ª ordem, com o valor elevado de 21,84%, enquanto as demais não ultrapassaram 2%. A distorção harmônica total foi de 22% no ponto 2.

**Tabela 31: Distorção harmônica da corrente simulada no ponto 2**

FREQ. (Hz)	CORRENTE ATP (A)	DHi
60	13,88	-
120	0,01	<b>0,07%</b>
180	0,25	<b>1,81%</b>
240	0,06	<b>0,43%</b>
300	0,22	<b>1,56%</b>
360	0,00	<b>0,00%</b>
420	3,03	<b>21,84%</b>
480	0,06	<b>0,00%</b>
540	0,00	<b>0,00%</b>
600	0,00	<b>0,00%</b>
660	0,13	<b>0,93%</b>
720	0,00	<b>0,00%</b>
780	0,05	<b>0,33%</b>
840	0,00	<b>0,03%</b>
900	0,00	<b>0,00%</b>
960	0,00	<b>0,00%</b>
1020	0,06	<b>0,41%</b>
1080	0,00	<b>0,00%</b>
1140	0,00	<b>0,00%</b>
1200	0,00	<b>0,00%</b>
1260	0,00	<b>0,00%</b>
1320	0,00	<b>0,00%</b>
1380	0,01	<b>0,06%</b>
1440	0,00	<b>0,00%</b>
1500	0,01	<b>0,04%</b>
	<b>DHTi</b>	<b>22%</b>

Com os resultados das DHT de tensão e de corrente obtidos, em porcentagem, o próximo passo é fazer a comparação com os valores obtidos através dos medidores de QEE. Os medidores utilizados *in loco* foram o PM 870, para se obter as distorções nos pontos P2, P6 e P8, o Fluke para medir as distorções nos pontos P8, P10 e P4. A Tabela 32 mostra a comparação das medições *in loco* nos cinco pontos selecionados, com os resultados das simulações.

**Tabela 32: Resumo dos resultados de distorção harmônica nos pontos monitorados**

<b>P2</b>			
DHT <sub>t</sub>		DHT <sub>i</sub>	
ATP	Medidor	ATP	Medidor
0,82 %	0,96%	22%	23,37%
3,40 V	3,45 V	2,16 A	2,21 A
<b>P4</b>			
DHT <sub>t</sub>		DHT <sub>i</sub>	
ATP	Medidor	ATP	Medidor
0,17%	0 - 0,32%	0,63%	0,99 – 0,93%
10,02 V	19 V	2,84 A	4,32 A
<b>P6</b>			
DHT <sub>t</sub>		DHT <sub>i</sub>	
ATP	Medidor	ATP	Medidor
8,85%	1,74%	36,22%	37,57%
36,47 V	6,47 V	64,77 A	68,40 A
<b>P8</b>			
DHT <sub>t</sub>		DHT <sub>i</sub>	
ATP	Medidor	ATP	Medidor
1,12%	0,21% - 1,22% Mín. - Máx.	62,01%	51,97%
4,63 V	0,84 V - 4,90 V	8,44 A	7,21 A
<b>P10</b>			
DHT <sub>t</sub>		DHT <sub>i</sub>	

ATP	Medidor	ATP	Medidor
0,54%	0,53% - 1,22% Mín. - Máx.	23,38%	2,28% - 9,18% Mín. - Máx.
2,23 V	1,94 V - 4,46 V	9,14 A	0,80 A - 3,21 A

Observa-se que o ponto 4 teve seus resultados de DHT de tensão na simulação e na medição *in loco* próximos. Os pontos P2 e P8 também tiveram a DHT de tensão simulada parecida com a DHT de tensão medida. O ponto P6, porém, referente ao precipitador apontou uma DHT de tensão maior na simulação do que a medida com o instrumento *in loco*, porém mudando-se o valor da impedância da linha na modelagem, que é um parâmetro passível de ajustes pelo fato de que as características físicas da linha foram coletadas visualmente, obtém-se melhora na DHT de tensão desse ponto.

Destaca-se o ponto P10, que teve seu valor de DHT de tensão idêntico ao medido pelo qualímetro, embora a DHT de corrente neste ponto foi a mais divergente; esse ponto, P10, é um ponto que está conectado a muitos equipamentos, com diferentes características, como motores, o retificador do P2, e o *UPS* do P8, e as cargas desses equipamentos podem variar muito num curto período de tempo, principalmente pela atuação dos diversos motores ali conectados. Tudo isso pode ter causado uma porcentagem maior de distorção harmônica na simulação, comparada com a medição.

Os pontos P2, P6 e P8, que eram bastante próximos dos equipamentos prováveis geradores de distorções harmônicas, tiveram resultados de DHT de corrente muito coerentes, semelhantes aos medidos com o qualímetro. A simulação do P4 resultou numa porcentagem de DHT de corrente similar ao da medição.

Outra possível fonte de erro a ser citada aqui diz respeito às datas de medições; devido à disponibilidade da equipe de medição, da empresa geradora, e também da autorização do órgão regulador, os pontos P2, P6 e P8 tiveram suas medições de



corrente em datas diferentes das medições de tensão, e além disso os pontos P4 e P10 também tiveram sua coleta de dados em datas diferentes entre si e também diferente dos demais. Ou seja, se a carga em distintos períodos do dia já pode oscilar, em meses distintos a diferença pode ser maior ainda.

Para finalizar o estudo, é feita a análise de comparação dos valores obtidos na simulação com o que é indicado pelo órgão responsável por regular a qualidade do produto e do serviço das concessionárias de energia elétrica no Brasil, a ANEEL. No PRODIST a ANEEL estabeleceu limites máximos para a DHI de tensão, conforme mostrou a Tabela 11 no capítulo 2 deste documento. O PRODIST não propõe valores limites para a DHI de corrente.

Baseando-se pelo PRODIST, o ponto 4 não tem ultrapassagem dos valores permitidos para a DHI de tensão. Todas as ordens harmônicas, ímpares, pares ou múltiplas de 3 estão bem abaixo do limite estipulado para tensão entre 1 kV e 13,8 kV que é o caso deste ponto.

O mesmo ocorre para o ponto 10, onde as harmônicas pares, ímpares ou múltiplas de 3 estão aquém do limite determinado para a DHI de tensão.

O ponto 6, pela simulação, tem problemas com os limites das ordens harmônicas pares, como é o caso da 2ª, 4ª, 6ª, 8ª, 10ª, 12ª e 14ª; também com a múltipla de 3, de ordem 15º, como pode ser observado na Tabela 33.

**Tabela 33: P6 - DHI de tensão fora do limite da ANEEL**

Ordem	2ª	4ª	6ª	8ª	10ª	12ª	14ª	15ª
Limite	2,5%	1,5%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Valor Simulado	3,20%	3,79%	2,62%	1,94%	1,88%	1,76%	1,61%	1,56%

O ponto 8, apesar de ter a 5ª e a 7ª harmônica bastante elevada, ainda está dentro dos limites do PRODIST, que são 7,5% e 6,5%, respectivamente para as ordens citadas.

O ponto 2 também não ultrapassa os valores estipulados pela ANEEL para tensões, as distorções estão bastante abaixo dos valores limites.

Desta forma, observando a resolução da ANEEL, existe um ponto que deve ser adequado, o ponto 6. Mas sabe-se que apesar de o PRODIST não estipular limites para as distorções de correntes, deve haver uma preocupação com o que ocorre nas correntes dentro do sistema, pois a influência é direta entre um e outro tipo de distorção.

Comparando os valores obtidos na simulação do ATP Draw com a legislação internacional, os pontos P10, P6, P8 e P2 estão fora do estabelecido para as distorções individuais de corrente, somente o P4 se encaixa nos limites.

## 6 CONCLUSÃO

A pesquisa feita neste trabalho envolveu a modelagem e simulação do sistema elétrico dos serviços auxiliares de uma usina termoeletrica do sul do Brasil. A modelagem e simulação teve o propósito de fazer uma análise de qualidade de energia, especificamente das distorções harmônicas.

A parte de modelagem feita detalhadamente para cada um dos componentes presentes na parte de estudo foi muito satisfatória, uma vez que os equipamentos modelados demonstraram um comportamento muito similar ao registrado na planta e os valores obtidos nas simulações também foram similares.

As simulações das distorções harmônicas tiveram um bom resultado, com algumas diferenças com os valores medidos, obtendo-se valores muito próximos nos pontos P2, P4, P8 e P10 para as DHT de tensões e para os valores de DHT de corrente, os resultados foram semelhantes nos pontos P2, P4, P6 e P8, porém divergente no ponto P10. Baseando-se nas comparações efetuadas, percebe-se que há coerência em toda a modelagem elaborada no software ATP Draw, e que a mesma pode servir de apoio à análise de qualidade de energia, no enfoque das harmônicas, podendo ser ainda melhorada. Melhoras que podem ser obtidas através de dados mais completos, se disponibilizados, algum ajuste para melhores resultados de valores conhecidos ou complementação com uso de diferentes elementos.

Conclui-se que a modelagem feita neste trabalho é de fato a representação fiel da parte requerida para o estudo, dentro da Unidade 3 da UTLA, e sua simulação corresponde ao seu funcionamento real. Portanto, é possível utilizar este sistema construído no ATP Draw para simular previamente qualquer modificação a ser feita na

Unidade 3 posteriormente, como melhorias, adequações, otimizações, ativações ou desativações de quaisquer elementos que possam ser modelados dentro da interface do ATP Draw.

Na continuidade do projeto de pesquisa ao qual este estudo de modelagem e simulação está relacionado é prevista uma etapa de inserção de filtros de harmônicas na planta; será utilizado o que foi modelado até então para simular a inclusão deste filtro e verificar os seus resultados.

## **6.1 TRABALHOS FUTUROS**

Os trabalhos futuros que podem ser propostos nesta área de pesquisa envolvem:

- Modelagem de filtro de harmônicas nos pontos que estão com distorções harmônicas muito elevadas ou acima do limite estipulado pelo PRODIST. Verificação, através de modelagem, se ocorre mitigação ou diminuição dos distúrbios nesses locais.

- Análise sobre a legislação internacional e nacional e sugestão sobre limites de distorções harmônicas de correntes.

- Análise minuciosa sobre os modelos utilizados atualmente no software ATP para motor de indução, confrontando seus comportamentos com o comportamento do modelo elaborado para esta modelagem, visando a melhoria da modelagem da parte mecânica. Verificam-se muitos modelos e certas divergências de modelagem desta parte, portanto, deve-se fazer um estudo de qual o melhor modelo dependendo do tipo de motor, para melhor representar seu funcionamento.

## 6.2 ARTIGOS

**M. Pomalis, D. Schwanz, A. Bretas, R. Leborgne, M. Gaidzinski, “Análisis de la Distorsión Armónica en los Servicios Auxiliares de una Central Térmica”, CIDEL – Congreso Internacional de Distribución Eléctrica, Argentina, Setembro/2014**

## REFERÊNCIAS

- ALTERIMA GERADORES. **Componentes de uma termoeletrica**. Disponível em: <<http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=20&InCdMateria=218&Componentes+de+usinas+hidrel%E9tricas>> Acesso em: 23.Maio 2013.
- ARRILLAGA, J. et al. **Power system harmonic analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonics**. 2nd.ed.[S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.
- ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM (ATP) DRAW. **User's manual version 5.6**. [S.l.]: Norwegian University of Technology Trondheim, 2009.
- ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM (ATP) DRAW. **Rule book**. [S.l.]: Comitê Argentino de Usuários de EMTP-ATP (CAUE), 2001.
- BAPTISTA, J. et al. Induction motor response to periodical voltage fluctuations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM), 2010, Rome. **Proceedings...** [S.l: s.n], 2010, 6p.
- BRAGA, N. C. Influência das Harmônicas na Alimentação de Dispositivos Eletrônicos: Efeitos e como eliminá-los. **Revista saber eletrônico**, São Paulo, n. 463, p. 26-29, Jul-Ago. 2012.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 469/2011**: PRODIST: módulo 8, Revisão 4. Brasília, DF, 2011.
- DAS, J. C. **Power system analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics**. 2nd.ed. [S.l.]: CRC Press, 2012.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. Disponível em:<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>> Acesso em: 21 Jan.2013
- DE LA ROSA, F. C. **Harmonics and power systems**. [S.l.]: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- DIAS, G. A. D. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2.ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2002.
- DUNGAN, R. C. et al. **Electrical power systems quality**. 2nd.ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2002.
- ELETROBRÁS. **Conservação de energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. 3.ed. Itajubá: FUPAI, 2006.
- FIGUEIREDO, A. A. C. **Análise de modelos para cargas não-lineares no estudo trifásico de penetração harmônica**. 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha da Solteira, 2006.

GONÇALVES, J. A. R. **Estudo do comportamento do motor de indução trifásico sujeito a perturbações na qualidade da energia.** 2008. 164p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Universidade de Trás-os-montes e Alto douro, Vila Real, 2008.

GONDIM, I. et al. Modelagem de condicionadores UPS estático (no break) sob condições não ideais de alimentação na plataforma ATP. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8., 2008, Poços de Caldas. **Anais...** [S.l.: s.n], 2008. p. 1-6.

GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob enfoque da eficiência energética.** 2008. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-2-2.** Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. [S.l.]: IEC, 2002.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-2.** Limits for hamonic current emission (equipment input current <16 A per phase). [S.l.]: IEC, 2009.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-4.** Limitation of emission of harmonic current in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A. [S.l.]: IEC, 1998.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 519-1992.** IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system. [S.l.]: IEEE, 1992.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 519-2012.** Guide for applying harmonic limits on power systems. [S.l.]: IEEE, 2012.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis.** 2.ed. New Mexico: CRC Press, 2007.

MARINHO et al. Simulação de circuitos introdutórios ao programa ATP Draw/ EMTP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE), 4., 2012, Goiânia. **Anais...** [S.l: s.n], 2012. p. 1-6.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Power system transients.** Parameter Determination. [S.l.]: CRC Press, 2010.

MARQUES, J. P. **Modelagem e análise da distorção harmônica de computadores em instalações elétricas.** 2011. 100p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2011.

MEDEIROS. A. S. **Desenvolvimento de software para simulação de motores com dispositivos de partida baseada na integração do ATP com o TOPReDE.** 2011. 64p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MORAES, E. E. C. **Estudo e projeto de filtros passivos para atenuação de harmônicos em instalações elétricas industriais.** 2011. 122 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas:** Causas, Efeitos e Soluções. 1.ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre (PROCOBRE), 2001.

NATURESA, J. S. **Geração, transmissão e distribuição de energia:** Qualidade de Energia Elétrica. Apostila Qualidade de Energia. Campinas, São Paulo. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/jimnaturesa/qualidade-de-energia-eltrica-presentation>>. Acesso em: 17 Abr.2013.

NDIAYE, M. S. **Modelagem de cargas não-lineares por fontes de corrente sincronizadas.** 2006. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

OLIVEIRA, M. O. **Proteção diferencial de transformadores trifásicos utilizando a transformada wavelet.** 2009. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Procedimentos de rede:** Módulo 20, Submódulo 20.1- Glossário de Termos Técnicos, 2009. Disponível em <[http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo\\_20/Subm%C3%B3dulo\\_20.1\\_Rev\\_1.0.pdf](http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_20/Subm%C3%B3dulo_20.1_Rev_1.0.pdf)> Acesso em: 14.Jun.2013.

PROCOBRE. **Qualidade de energia elétrica:** Harmônicas. Curso de Instalações Elétricas Internas – Módulo 4, 2009. Disponível em: Leonardo Energy Brasil. <<http://www.leonardo-energy.org.br/biblioteca-virtual/instalacoes-eletricas-internas-modulo-4/>> Acesso em: 28.Abr.2013

RAMOS, A. J. P.; FONTANA, E.; LIMA, M. C. Análise do desempenho de múltiplos compensadores estáticos em sistemas radiais fortemente carregados considerando a presença de cargas dinamicamente ativas. In: SOCIEDADE BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (SBQEE), 2., 1997, São Lourença. **Anais...** [S.l : s.n], 1997. p. 1-6

ROSSI, M. V. B. **Projeto Elétrico básico industrial e diretrizes para avaliação de distorção harmônica.** 2011. 120 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SCHNEIDER ELETRIC; PROCOBRE. **Qualidade de energia:** Harmônicas. Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão, 2003. Disponível em: <<http://www.schneider.com.br>> Acesso em: 24.Fev.2013.



SCHWANZ, D. **Análise da distorção harmônica de um parque eólico através da sua modelagem no domínio do tempo e da frequência.** 2013. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA (SIECESC). **Relatório setorial 2008.** Disponível em: <<http://www.siecesc.com.br/>> Acesso em: 20 Maio 2013.

SOUSA, M. H. de **Determinação dos parâmetros de máquinas síncronas pelo ensaio de resposta em frequência:** proposta de metodologia com inversor de frequência. 2011. 94p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TLEIS, N. A. **Power system modelling and fault analysis.** Theory and Practice. [S.l.]: Elsevier, 2008.

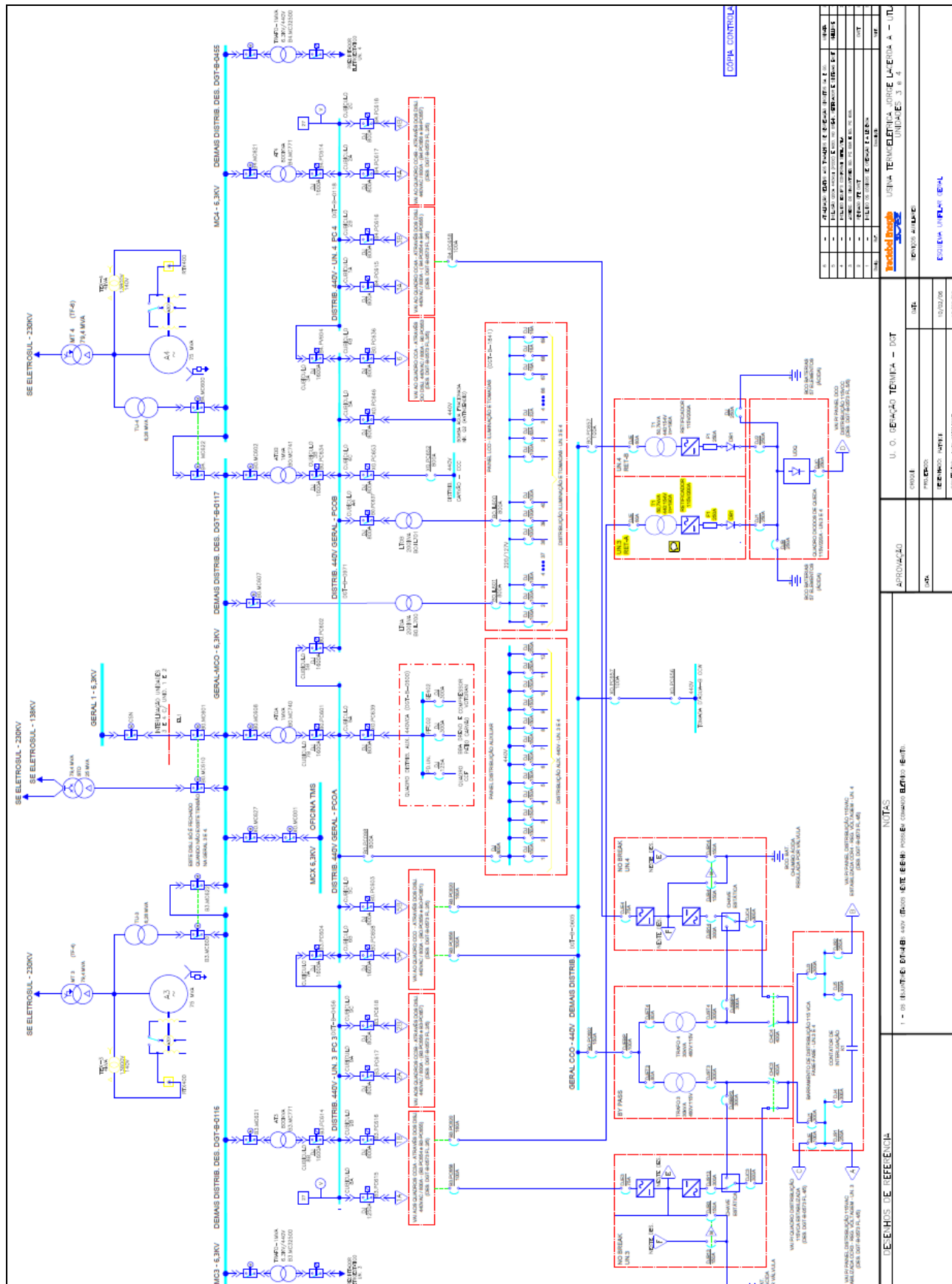
TRACTEBEL ENERGIA. **Ficha técnica** – complexo jorge lacerda. Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-termeletricas/complexo-termeletrico-jorge-lacerda>> Acesso em: 20 Maio 2013.

TRACTEBEL ENERGIA. **Parque gerador** - capacidade instalada. Disponível em: <[www.tractebelenergia.com.br](http://www.tractebelenergia.com.br)> Acesso em: 11 Dez 2013.

ZAPPELINI, A. B. **Análise de eficiência energética em sistema de ar comprimido.** 2008. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

**ANEXOS**

# ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR UTLA 3 E 4



ITEM	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR TOTAL (R\$)
1	SELETRÔSUL - 230KV	3	UN	1.000.000,00	3.000.000,00
2	SELETRÔSUL - 138KV	1	UN	500.000,00	500.000,00
3	MCA 6.3KV	1	UN	100.000,00	100.000,00
4	MCA 40V GERAL	1	UN	200.000,00	200.000,00
5	MCA 40V JUN 3	1	UN	150.000,00	150.000,00
6	MCA 40V JUN 4	1	UN	150.000,00	150.000,00
7	MCA 40V JUN 5	1	UN	150.000,00	150.000,00
8	COMPL. CONTROL	1	UN	500.000,00	500.000,00
<b>TOTAL</b>					<b>5.100.000,00</b>

DESCRIÇÃO	UNIDADE	QUANTIDADE	VALOR UNITÁRIO (R\$)	VALOR TOTAL (R\$)	
SELETRÔSUL - 230KV	UN	3	1.000.000,00	3.000.000,00	
SELETRÔSUL - 138KV	UN	1	500.000,00	500.000,00	
MCA 6.3KV	UN	1	100.000,00	100.000,00	
MCA 40V GERAL	UN	1	200.000,00	200.000,00	
MCA 40V JUN 3	UN	1	150.000,00	150.000,00	
MCA 40V JUN 4	UN	1	150.000,00	150.000,00	
MCA 40V JUN 5	UN	1	150.000,00	150.000,00	
COMPL. CONTROL	UN	1	500.000,00	500.000,00	
<b>TOTAL</b>					<b>5.100.000,00</b>

**DESCRIÇÃO DE REFERÊNCIA**

U. O. DE AÇÃO TÉCNICA - DOT

APROVAÇÃO

PROJETO

REVISÃO

COMANDO

LEITANTE

## ANEXO B – TABELA DOS VALORES DE R E L DE CADA CIRCUITO TRIFÁSICO

TRECHO	RESISTÊNCIA [ $\Omega$ ]	INDUTÂNCIA [mH]
Barra MC3 – Transformador B3MC771	4,37213E-3	0,1091915
Transformador B3MC771 – Barra 440V	1,199988E-3	0,032004
Barra 440V – Transformador T1	0,04023015	0,0398655
Transformador T1 - Retificador	0,0034275	0,03574035
Barra 440V – Motor	0,0252705	0,0391479
Barra 440V – UPS	0,0162576	0,038455
Barra MC3 – Transformador B3MC32500	4,37903E-3	0,109173
Transformador B3MC32500 – Precipitador	0,013130	0,1867568
Barra MC3 - Motor 1	0,0214805	0,1230925
Barra MC3 - Motor 2_1	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 2_2	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 3_1	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 3_2	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 3_3	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 4_1	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 4_2	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 5_1	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 5_2	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 6_1	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 6_2	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 8_1	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 8_2	0,1341005	0,132885
Barra MC3 - Motor 8_3	0,1341005	0,132885

## ANEXO C – TABELA DE DADOS DOS TRANSFORMADORES

Parâmetro de entrada solicitado	Dado disponibilizado
<b>MT3</b>	
Número de fases	3
Número de enrolamentos	2
Frequência	60 Hz
Tensão linha-linha (Alta)	230 kV
Tensão linha-linha (Baixa)	13.8 kV
Potência	79.4 MVA
Conexão	Y-D (330°)
<u>Dados Ensaio – Circuito Aberto:</u>	
Tensão (%)	100
Corrente (%)	0.17
Perdas (kW)	0.3019
<u>Dados Ensaio – Curto-Circuito:</u>	
Impedância (%)	10.05
Potência (MVA)	79.4
Perdas (kW)	0.213
Dados fornecidos pela Tractebel Energia. Data do ensaio: 08.11.71 por CoEmSA.	
<b>TU-3</b>	
Número de fases	3
Número de enrolamentos	2
Frequência	60 Hz
Tensão linha-linha (Alta)	13.8 kV
Tensão linha-linha (Baixa)	6.3 kV

Potência	6.28 MVA
Conexão	$\Delta$ - $\Delta$ (0°)
<u>Dados Ensaio – Circuito Aberto:</u>	
Tensão (%)	90   100   105   110
Corrente (%)	0.228   0.349   0.467   0.681
Perdas (kW)	0.0153   0.0196   0.0224   0.0263
<u>Dados Ensaio – Curto-Circuito:</u>	
Impedância (%)	7.35
Potência (MVA)	6.28
Perdas (kW)	0.00532

Dados fornecidos pela Tractebel Energia. Data do ensaio:08.09.04 por WEG Indústrias SA

AT3	
Número de fases	3
Número de enrolamentos	2
Frequência	60 Hz
Tensão linha-linha (Alta)	6.3 kV
Tensão linha-linha (Baixa)	0.440 kV
Potência	0.8 MVA
Conexão	D - Y (330°)
<u>Dados Ensaio – Circuito Aberto:</u>	
Tensão (%)	100
Corrente (%)	1.1
Perdas (kW)	2.53
<u>Dados Ensaio – Curto-Circuito:</u>	
Impedância (%)	7.64
Potência (MVA)	0.8

Perdas (kW)	10.28
-------------	-------

Dados de ensaio do Trafo de 1 MVA (6.6kV-440V).

Impedância: da placa do Trafo de 0.8 MVA.

Trafo do PRECIPITADOR	
Número de fases	3
Número de enrolamentos	2
Frequência	60 Hz
Tensão linha-linha (Alta)	6.3 kV
Tensão linha-linha (Baixa)	0.440 kV
Potência	1 MVA
Conexão	D - Y (30°)
<u>Dados Ensaio – Circuito Aberto:</u>	
Tensão (%)	100
Corrente (%)	1.1
Perdas	2.53
<u>Dados Ensaio – Curto-Circuito:</u>	
Impedância (%)	6.34
Potência (MVA)	1
Perdas (kW)	10.28

Dados fornecidos pela Tractebel Energia. Data do ensaio: 07.11.06 por WEG SA

T1	
Número de fases	3
Número de enrolamentos	2
Frequência	60 Hz
Tensão linha-linha (Alta)	0.440 kV
Tensão linha-linha (Baixa)	0.154 kV

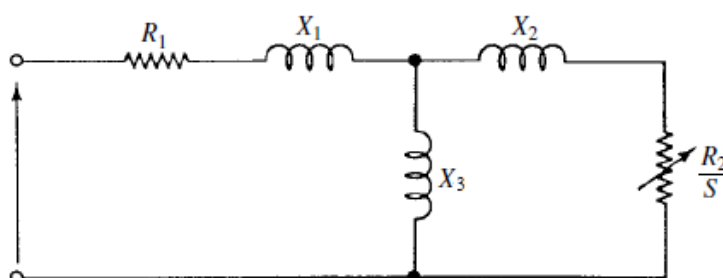
Potência	0.0507 MVA
Conexão	Y-D (30°)
<u>Dados Ensaio – Circuito Aberto:</u>	
Tensão (%)	100
Corrente (%)	2.94
Perdas (kW)	0.327
<u>Dados Ensaio – Curto-Circuito:</u>	
Impedância (%)	3.63
Potência (MVA)	0.0507
Perdas (kW)	1.47

Dados fornecidos pela empresa fabricante de transformadores: MVA Transformadores.  
 Valores de um Trafo de 50 kVA que transforma 440V – 220V. Data do ensaio: 15.04.13



## ANEXO D – FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA MOTDATPR

Supõe-se que a tensão nominal, a potência, o deslizamento, a eficiência, o fator de deslocamento e a corrente do rotor bloqueado são conhecidos. A potência é a potência consumida na resistência de carga  $R_2$   $(1-s)/s$  do circuito equivalente. A eficiência é a potência elétrica "útil" dividida pelo total de potência absorvida pelo motor. O circuito equivalente do motor de indução é o seguinte:



É preciso assumir algum valor para  $X_1$ , pois há muitas incógnitas em relação ao número de equações. As incógnitas são  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ . As equações podem ser escritas para a potência, eficiência, fator de deslocamento e a corrente de rotor bloqueado.

A resistência  $R_1$  é solucionada primeiro. Quando a potência útil por fase é  $P/3$ , as perdas no  $R_2$  são:

$$(P / 3) * s / (1-s) \quad [1]$$

As perdas em  $R_1$  são:

$$I^2 R_1 \quad [2]$$

A potência total absorvida pelo motor, por fase, é:

$$U I \cos \phi = I^2 R_1 + (P/3)/(1-s) \quad [3]$$

Onde  $U$  é a tensão fase-neutro e  $I$  é o valor da corrente nominal absoluta. Como  $P/3$  é igual à potência consumida pelo motor vezes a eficiência, ou seja:

$$P/3 = \eta I U \cos \phi \quad [4]$$

Então, a resistência  $R_1$  é igual a:

$$R_1 = (U \cos \phi / I) (1 - \eta / (1-s)) \quad [5]$$

A solução das outras impedâncias é um pouco mais complicada. Primeiro define-se a "impedância aparente"  $R_a + jX_a$  como  $i = U / (R_a + jX_a)$ , onde  $i$  é a corrente nominal complexa do motor.

Presumindo-se que a voltagem, a potência, e outros parâmetros são conhecidos para o motor, os valores numéricos da corrente  $i$  e a impedância aparente podem ser calculados.

As equações para a resistência  $R_a$  e reatância  $X_a$  da impedância aparente podem ser derivadas utilizando o circuito equivalente do motor, como:

$$R_a = R_1 + R X_3^2 / [R^2 + (X_2 + X_3)^2], \text{ onde } R = R_2/s \quad [6]$$

$$X_a = X_1 + [R^2 X_3 + X_2 X_3 (X_2 + X_3)] / [R^2 + (X_2 + X_3)^2] \quad [7]$$

Em seguida,  $R^2$  é resolvido na equação [6] e substituído em [7]. Após algumas simplificações e assumindo  $X_1 = X_2$ , uma equação é obtida para  $R$ :

$$R (X_3 + X_2 - X_a) = (X_2 + X_3) (R_a - R_1), \text{ onde } R=R_2/s \quad [8]$$

Então,  $R$  é solucionado a partir de [8] e substituído em [6], que resulta numa equação para  $X_3$ :

$$X_3^2 = (R_a - R_1)^2 (X_2 + X_3) / (X_2 + X_3 - X_a) + (X_2 + X_3) (X_2 + X_3 - X_a) \quad [9]$$

Após estes cálculos,  $R_1$  é conhecida, e a resistência  $R_2$  e as reatâncias,  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  podem ser expressas como uma função de  $X_2 + X_3$ , que ainda é desconhecido. A soma

de  $X_2 + X_3$  deve ser resolvida de forma iterativa a partir da equação para a corrente de rotor bloqueado. Isso completa a solução das impedâncias.

**ANEXO E – TABELA DE FREQUÊNCIAS E CORRENTES HARMÔNICAS DO PRECIPITADOR, RETIFICADOR E UPS**

Precipitador		
Ordem harmônica	Frequência	Corrente
2 <sup>a</sup>	120 Hz	45,6978 A
3 <sup>a</sup>	180 Hz	28,7383 A
4 <sup>a</sup>	240 Hz	27,7941 A
5 <sup>a</sup>	300 Hz	19,2318 A
6 <sup>a</sup>	360 Hz	13,5219 A
7 <sup>a</sup>	420 Hz	7,7581 A
8 <sup>a</sup>	480 Hz	7,7179 A
9 <sup>a</sup>	540 Hz	6,5672 A
10 <sup>a</sup>	600 Hz	6,3124 A
11 <sup>a</sup>	660 Hz	5,7118 A
12 <sup>a</sup>	720 Hz	5,2874 A
13 <sup>a</sup>	780 Hz	4,7891 A
14 <sup>a</sup>	840 Hz	4,3609 A
15 <sup>a</sup>	900 Hz	4,1209 A
Retificador		
Ordem harmônica	Frequência	Corrente
3 <sup>a</sup>	180 Hz	0,5951 A
4 <sup>a</sup>	240 Hz	0,1163 A
5 <sup>a</sup>	300 Hz	0,3793 A

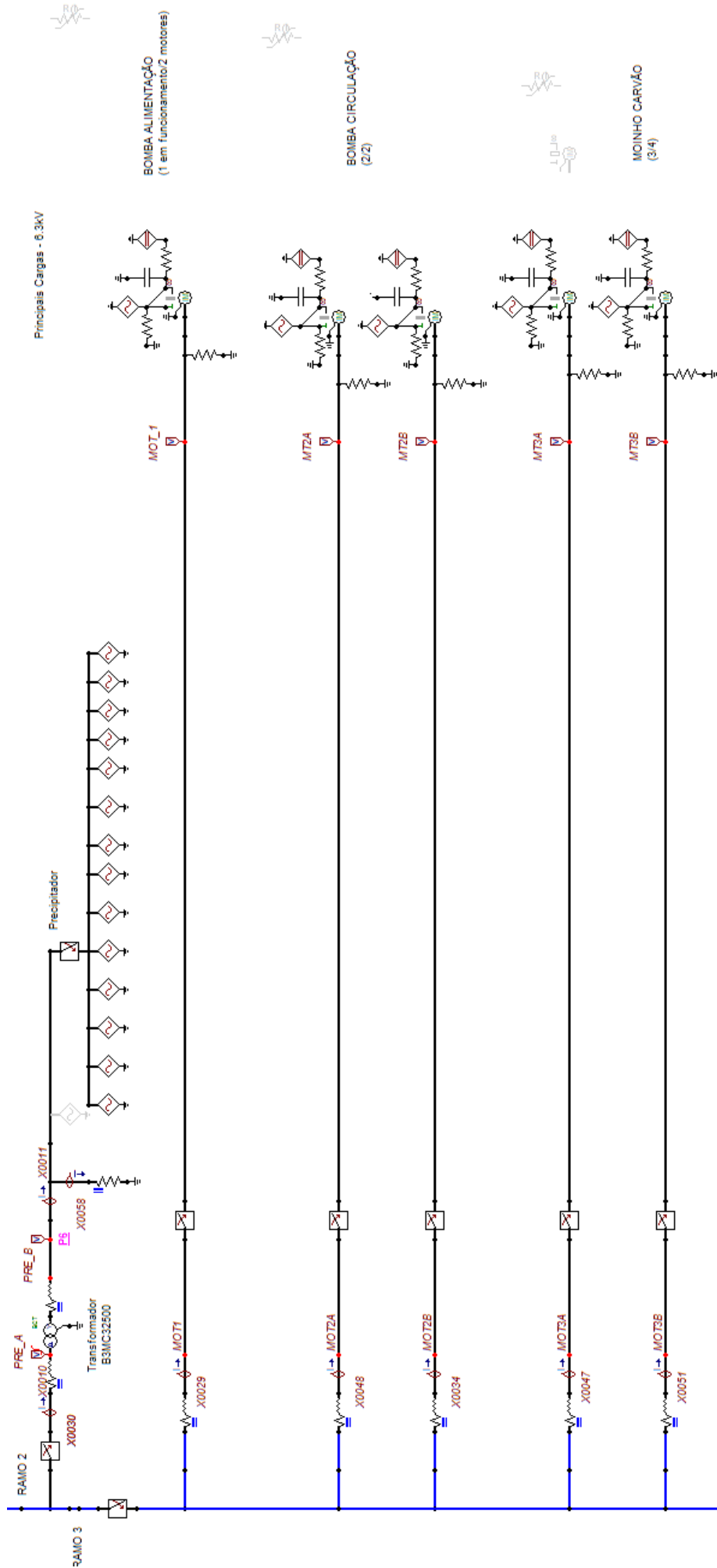
6 <sup>a</sup>	360 Hz	0,122 A
7 <sup>a</sup>	420 Hz	6,2564 A
8 <sup>a</sup>	480 Hz	0,124 A
9 <sup>a</sup>	540 Hz	0,1465 A
11 <sup>a</sup>	660 Hz	0,2612 A
13 <sup>a</sup>	780 Hz	0,1115 A
17 <sup>a</sup>	1020 Hz	0,1152 A
19 <sup>a</sup>	1140 Hz	0,1456 A

## UPS

Ordem harmônica	Frequência	Corrente
2 <sup>a</sup>	120 Hz	0,3407 A
3 <sup>a</sup>	180 Hz	0,8774 A
4 <sup>a</sup>	240 Hz	0,3534 A
5 <sup>a</sup>	300 Hz	7,1983 A
7 <sup>a</sup>	420 Hz	4,1221 A
11 <sup>a</sup>	660 Hz	0,7575 A
13 <sup>a</sup>	780 Hz	1,0962 A
17 <sup>a</sup>	1020 Hz	0,3407 A
19 <sup>a</sup>	1140 Hz	0,4036 A
23 <sup>a</sup>	1380 Hz	0,2129 A
25 <sup>a</sup>	1500 Hz	0,1223 A
29 <sup>a</sup>	1740 Hz	0,2301 A







BOMBA ALIMENTAÇÃO  
(1 em funcionamento 2 motores)



BOMBA CIRCULAÇÃO  
(2/2)



MOINHO CARVÃO  
(3/4)

